М. Я. МАРОВ

ПЛАНЕТЫ Солнечной системы

М. Я. МАРОВ

ПЛАНЕТЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
ЛИТЕРАТУРЫ
1981

22.65
М 28
УДК 523.4

Маров М. Я.

М 28 Планеты Солнечной системы. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. — 256 с., илл.: 45 к.

Исследования планет Солнечной системы в последнее время развиваются бурными темпами как с помощью наземных средств наблюдения, так и, особенно, с помощью космических аппаратов. Получены многочисленные результаты, очень серьезно изменившие наши прежние представления о девяти больших планетах и их спутниках. Автор, много работавший в этой области, поставил себе целью систематически изложить современные представления о планетах, о господствующих на них физических условиях.

Для широкого круга читателей, обладающих подготовкой в объеме средней школы и интересующихся проблемами современной астрофизики и космических исследований. Книга будет интересна преподавателям средней школы, лекторам, студентам естественно-научных факультетов.

М $\frac{20604-066}{053(02)\text{-}81}$ КБ-2-42—81. 1705050000 ББК 22.65 526

Михаил Яковлевич Маров

ПЛАНЕТЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

М., 1981 г., 256 стр. с илл.

Редакторы *М. М. Дагаев, Г. С. Куликов*
Техн. редактор *Е. В. Морозова* Корректор *А. Л. Ипатова*

ИБ № 11216

Сдано в набор 30.10.80. Подписано к печати 07.04.81. Т-05750. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 2. Литературная гарнитура. Высокая печать. Услов. печ. л. 13,44. Уч.-изд. л. 13,9. Тираж 87500 экз. Заказ № 2253. Цена 50 коп.

Издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117077, Москва, Ленинский проспект, д. 15

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, М-54, Валовая, 28

М $\frac{20604-066}{053(02)\text{-}81}$ КБ-2-42—81. 1705050000

ОТ АВТОРА

Собираясь написать популярную книгу, прежде всего задаешься вопросом: кому она адресована? Хочется, конечно, чтобы ее прочитала как можно более широкая аудитория. Значит, книга должна быть написана доступно. Однако доступность нельзя отождествлять с излишней упрощенностью, которая совершенно справедливо не удовлетворит взыскательного читателя. К тому же знакомство с любым серьезным предметом (как бы увлекательно ни стремился автор о нем рассказать) и просто занимательное чтение — далеко не одно и то же. Поэтому автор вправе надеяться, что его усилия будут помножены на терпение читателя, стремящегося познакомиться с интересующим его разделом науки.

Мы собираемся побеседовать об одной из чрезвычайно интересных и бурно развивающихся областей астрофизики — об исследованиях планет Солнечной системы. За прошедшее десятилетие эта область особенно сильно испытала на себе благотворное воздействие новейших средств и методов, открывшихся прежде всего благодаря использованию ракетно-космической техники. Полеты космических аппаратов к Венере, Марсу, Меркурию, Юпитеру, Сатурну принесли уникальную информацию о природе этих планет, объем и важность которой превосходит сведения, полученные за предыдущие столетия классическими средствами наблюдательной астрономии. Наметился подход к всестороннему, комплексному изучению каждого из ближайших к нам небесных тел, получили дальнейшее развитие методы теоретического моделирования процессов и явлений, происходящих на поверхностях, в атмосферах, в недрах планет и в пограничных областях космического пространства. Эти знания помогают выявлению природных закономерностей в том довольно ограниченном по космическим

масштабам мире, в котором мы живем, пониманию того, что происходило здесь в прошлом и как будет продолжаться в будущем. В этих знаниях — ключ к решению фундаментальных проблем современного естествознания, связанных с происхождением и эволюцией планетной системы.

Сравнительное изучение планет и их спутников — «лун» — имеет первостепенное значение и для познания природы Земли. Нам еще далеко не ясны те условия, которые привели к формированию разнообразных природных комплексов, в том числе благоприятствовавших зарождению и развитию жизни на Земле. Отыскание их поможет в свою очередь установить диапазон допустимых отклонений от сложившихся за многие миллионы лет взаимосвязей вследствие все возрастающего воздействия человечества на окружающую среду, за пределами которых эти отклонения могли бы приобрести опасный, необратимый характер.

О значительном прогрессе наших знаний о природе планет хорошо известно лишь ограниченному кругу специалистов. Остальные читатели могут знакомиться в основном лишь с отдельными, фрагментарными материалами по немногочисленным публикациям в научно-популярных журналах. Появившиеся за последние годы несколько книг, посвященных истории открытий, движениям, свойствам планет и другим аспектам планетной астрономии, не могут в полной мере восполнить этот пробел. Поэтому нам казалось полезным рассказать обо всех важнейших направлениях современных планетных исследований. При этом, в отличие от обычно используемой формы изложения (последовательно о каждой из планет), мы попытались рассмотреть планеты путем сопоставления их основных природных особенностей в разделах, посвященных соответственно механическим характеристикам и параметрам движения, поверхностям, внутреннему строению, физическим свойствам атмосферы и метеорологии. Затрагиваются также некоторые общие проблемы планетной космогонии, тепловой истории и климатической эволюции.

Такая форма изложения кажется нам наиболее подходящей на современном этапе исследований, когда основной упор делается на обобщении и сопоставлении сведений о разнообразных природных комплексах на телах Солнечной системы, на выявлении их общих или род-

ственных черт и принципиальных различий. Именно в этом заложен тот эволюционный подход к изучению Земли, ее ближайшего окружения и Солнечной системы в целом, на котором будут сосредоточены в дальнейшем усилия физиков и астрономов, посвятивших себя этой увлекательной области науки.

Книга основана на обширном материале советских и зарубежных исследований, включающих результаты, полученные космическими аппаратами, наземными оптическими и радиоастрономическими измерениями, а также обобщением этих данных в рамках теоретических моделей. Она снабжена большим числом иллюстраций, среди которых основное место занимают фотографии планет, наиболее ярко и впечатляюще рассказывающие о том, как в действительности выглядят планеты и их спутники. Автор благодарен своим многочисленным коллегам, вместе с которыми проводились исследования и неоднократно обсуждались различные проблемы физики планет. Он пользуется возможностью выразить признательность американским ученым Г. Мазурскому, Д. Моррисону, К. Сагану, Т. Оуэну, Э. Янгу, приславшим ему фотоснимки, переданные с космических аппаратов, и другие материалы, а также руководству Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства за любезное согласие на их использование. Его приятный долг — поблагодарить В. Н. Жаркова, прочитавшего рукопись и сделавшего ряд полезных замечаний, а также Н. Д. Розман и Л. Д. Ломакину за помощь при подготовке материалов к печати.

Итак, кому же адресована эта книга? Нам думается, что она представит интерес для тех, кто интересуется проблемами астрономии, геофизики, космических исследований. Книга вполне доступна читателям, имеющим среднее образование. Мы старались избегать использования математического аппарата и специальной терминологии или давать пояснения там, где принятые в астрономии термины все же употреблялись. Хочется надеяться, что книгу с интересом прочтут также специалисты других отраслей знания, а специалисты смежных областей смогут найти в ней для себя немало полезных сведений и возможно захотят поглубже познакомиться с некоторыми отдельными вопросами или предметом в целом. Если эти надежды в какой-то степени оправдаются, мы будем считать свою цель достигнутой.

Касаясь столь грандиозной темы как планеты Солнечной системы, естественно невозможно одинаково подробно рассказать обо всех ее многочисленных аспектах. В отборе материала, в специфике изложения, в самом подходе к теме, конечно, сказались личные интересы и вкусы автора. Чему-то, наверное, надо было уделить больше внимания, что-то, наоборот, опустить. Кое-кто из читателей, возможно, увидит достоинство в том, что другой будет склонен считать недостатком. Как мы ни стремились максимально учесть наиболее свежие данные, это оказалось невозможным при том ошеломляющем потоке новых сведений, который столь характерен для современного этапа исследований Солнечной системы. Поэтому отдельные сведения могут устареть почти одновременно с выходом книги. Все критические замечания и пожелания по ее содержанию будут приняты с благодарностью; их можно направлять по адресу: 117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука».

В том, что известно, пользы нет,
Одно неведомое нужно.

И. В. Гёте, «Фауст»

... Прилепись паутинкой к звезде...
Повернись к мирозданью лицом.

Н. Заболоцкий, 1946

ВВЕДЕНИЕ

О планетах — «блуждающих звездах» — человечество знало уже в глубокой древности. Причудливые видимые движения пяти ярких звездообразных светил на ночном небе, резко выделявшие их среди других многочисленных звезд, далеко не сразу нашли свое объяснение; воспоминание об этой отдаленной эпохе сохранилось в самом названии «планета», что в переводе с греческого означает «блуждающая».

Самые первые попытки отыскать определенные закономерности в этих блужданиях опирались на развитие астрономии и геометрии в Древней Греции и странах Востока — Китае, Индии, Египте. Это было непосредственно связано с потребностями мореплавания, летосчисления и созданием календаря, а также с формированием начальных представлений о Вселенной. Согласно космологии Аристотеля (IV в. до н. э.), опиравшейся на еще более раннюю планетную теорию Евдокса Книдского, наблюдаемые движения планет объяснялись равномерным несоосным вращением друг относительно друга концентрических полых сфер, к внутренним поверхностям которых прикреплена каждая планета, а в центре находится Земля. В этой теории нашли свое отражение общие концепции философии Аристотеля, делившего весь «подлунный» мир на оболочки земли, воды, воздуха, огня и эфира. Значительно более строгое обоснование геоцентрической системы мира было дано позднее в трудах Клавдия Птолемея, издавшего во II в. н. э. свое знаменитое сочинение «Великое математическое построение

астрономии в 13 книгах» — «Альмагест». Опираясь на идеи другого древнегреческого геометра Аполлония Пергского, заменившего вращающиеся планетные сферы Аристотеля кругами и тем самым заложившего основы теории эпициклов, Птолемей установил законы наблюдаемого движения планет, позволявшие предвычислять их положения. Тем самым были подведены итоги многовековых астрономических наблюдений и систематизирована вся совокупность знаний того периода. И хотя сами геометрические построения оказались исключительно сложными, что естественным образом было связано с ошибочностью исходных предпосылок о геоцентричности мира, труды Птолемея имели большое прогрессивное значение. Особенно велика была их практическая ценность для мореплавания и определения географических координат.

Подлинно научные основы современной астрономии были заложены только приблизительно 15 веков спустя трудами великого польского ученого Николая Коперника (1473—1543). Он решительно отбросил геоцентрическую систему Птолемея и заменил ее гелиоцентрической системой мира, с Солнцем в центре и обращающимися вокруг него планетами, которая убедительно и просто объясняла их видимое движение. Изданный в 1543 г. выдающийся труд Коперника «Об обращениях небесных сфер» стал по-настоящему революционным шагом, определившим все последующее развитие астрономической науки. Однако потребовалось еще много лет, прежде чем на смену устоявшимся догмам средневековой схоластики, освященным церковью, пришло действительно научное мировоззрение. Астрономические наблюдения Г. Галилея (1564—1642) в построенный им телескоп, теория движения планет, сформулированная и математически обоснованная И. Кеплером (1572—1630), переход от кинематического объяснения движений в Солнечной системе к динамическому благодаря открытию И. Ньютоном (1643—1727) закона всемирного тяготения — все это явилось блестящим подтверждением и подлинным триумфом коперниковского учения. Между тем запрет, наложенный инквизицией на исторический труд Коперника, официально был снят лишь почти 300 лет спустя после его издания.

Работы Коперника практически совпали по времени с началом эпохи великих географических открытий, ког-

да невиданно быстрыми темпами стали расширяться представления о мире за ограниченными пределами европейского континента. Именно в этот период здесь начался процесс зарождения мануфактурного производства, послужившего основой последующего интенсивного промышленного развития ряда западноевропейских стран. Развитие промышленности предъявляло растущие требования к внутренним и внешним рынкам, стимулируя тем самым снаряжение многочисленных морских экспедиций. Благодаря этим экспедициям, предпринятым несколькими поколениями отважных мореплавателей, была окончательно доказана сферичность Земли (упоминавшаяся еще в учении Пифагорейской школы в VI в. до н. э.), открыты новые земли и целые континенты, европейцы узнали об уникальных и порой экзотических регионах, приобщились к культуре населяющих их народов. Этот бурный процесс открытия и затем заселения новых обширных территорий фактически продолжался вплоть до нынешнего столетия, когда на нашей планете по существу уже не осталось «белых пятен». А современная авиация сократила время полета между континентами до нескольких часов.

Выход в космос, открытый 4 октября 1957 г. запуском первого советского искусственного спутника Земли, явился крупнейшим свершением человечества, современниками которого нам посчастливилось быть. Трудно переоценить значение этого достижения для астрономии, для наук о Земле, для повседневной хозяйственной деятельности людей, наконец, для культуры и социологии. Не касаясь здесь этих многочисленных аспектов, несомненно хорошо известных читателю, отметим лишь, что спутники и космические аппараты впервые позволили взглянуть на Землю как на планету из космоса и положили начало изучению ее разнообразных физических характеристик методами «обращенной астрономии», т. е. при помощи аналогов тех инструментов, которые используются астрономами на обсерваториях при исследовании излучения планет, звезд, туманностей. Были начаты ранее недоступные непосредственные исследования многообразных процессов и явлений, происходящих в ближайших окрестностях Земли, изучение их взаимосвязи с деятельностью Солнца, выявление определенных закономерностей. Наконец, благодаря полетам космических аппаратов стало возможным всесто-

роннее изучение других ближайших небесных тел — соседей Земли по Солнечной системе. Этот период «знакомства» с небесными соседями, с их природными особенностями, начатый в 60-е годы нашего столетия, можно уподобить эпохе великих географических открытий, масштаб которых распространился ныне далеко за пределы Земли, почти на всю Солнечную систему.

Совершенно очевидно, что космические исследования не привели к пересмотру фундаментальных концепций, основанных на астрономических наблюдениях, — механических характеристик планет или законов их движения. Наоборот, эти характеристики, добытые классическими методами оптической и радиоастрономии, были блестяще подтверждены и в ряде случаев уточнены. Однако полеты космических аппаратов обеспечили принципиально новое качество в получении сведений о физической природе планет, особенностях основных действующих природных механизмов, — одним словом там, где наземные средства наблюдений недостаточно эффективны или попросту бессильны. Можно поэтому без преувеличения сказать, что после некоторого периода относительного застоя планетная астрономия переживает сейчас период Высокого Возрождения. Открылся неведомый ранее лик планет, неизмеримо возросли возможности и эффективность наблюдений, расширился их диапазон. Стало доступным проведение непосредственно на небесных телах прямых физических экспериментов, подобных геофизическим исследованиям на Земле, изучение внеземного вещества в земных лабораториях. Такое вторжение геофизики в традиционные сферы астрономии, значительно бóльшая, чем это было раньше, «доступность» Луны и планет естественным образом приблизили этот раздел астрофизики к комплексу наук о Земле, и процесс этот будет в дальнейшем несомненно углубляться.

Историческое значение этого периода в жизни человечества, может быть, в полной мере будет оценено лишь нашими потомками, подобно тому, как мы, наверное, только сейчас можем в полной мере оценить научные подвиги Коперника, Галилея, Ньютона.

Космологию Аристотеля от учения Коперника отделяет почти 20 столетий, создание уточненной теории движения планет от начала полетов к ним космических аппаратов — около трех веков. Исследования Солнечной

системы продолжаются менее двух десятилетий, и поток открытий буквально ошеломляющий. Вполне вероятно, однако, что темпы эти в дальнейшем замедлятся, и к началу нового тысячелетия рекогносцировочный этап исследования далеких окрестностей планетной системы и подробное изучение ближайшего окружения Земли в основном завершится. Одновременно такие традиционные разделы человеческих знаний, как геофизика, геохимия, геология, будут во все большей степени становиться разделами космофизики, космохимии, планетологии, а также физики атмосферы и метеорологии, и это создаст необходимые предпосылки для более глубокого и всестороннего изучения нашей собственной планеты. Возрастет осознание значимости проблем комплексного изучения Земли и планет, вплотную поставленных перед человечеством XX века.

И я выхожу из пространства
В запущенный сад величин,
И мнимое рву постоянство
И самосознанье причин.
И твой, бесконечность, учебник,
Листаю один, без людей,
Безлиственный, дикий учебник,
Задачник огромных корней.

О. Мандельштам, 1933

Глава I. НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Мы начнем разговор о планетах с некоторых общих характеристик Солнечной системы, членами которой они являются наряду с другими холодными телами — астероидами, кометами, метеорной пылью.

Планеты отделены от нас огромными расстояниями в десятки и сотни миллионов километров. Для того чтобы на Земле принять радиосигнал с космического аппарата, находящегося вблизи Венеры или Марса, приходится даже при самых благоприятных условиях ожидать несколько минут, а ведь радиоволны, как и всякое электромагнитное излучение, распространяются со скоростью света! В пределах Солнечной системы за единицу расстояний принимают астрономическую единицу (а. е.), т. е. среднее расстояние Земли от Солнца, составляющее 149,6 млн. км. Свет проходит это расстояние за 8 мин 19 с. Средний радиус орбиты самой далекой из известных нам планет — Плутона — 40 а. е., и чтобы с нее достичь Земли, радиосигналу требуется почти пять с половиной часов.

Однако пределы Солнечной системы не ограничиваются поперечником орбиты Плутона — на самом деле они значительно его превышают. Исходя из чисто физических соображений, за ее внешнюю границу можно было бы принять расстояние, на котором происходит торможение в межзвездном газе непрерывно вытекающей из Солнца и заполняющей все околосолнечное пространство плаз-

мы — «солнечного ветра». Границы этой области называют гелиопаузой. Задача о натекании солнечной плазмы, обладающей сверхзвуковой скоростью, на межзвездный газ, состоящий почти целиком из ионизованного водорода при температуре ~100 К, была подробно рассмотрена советскими физиками В. Б. Барановым и К. В. Краснобаевым. Оказалось, что для идеализированной модели сферически симметричного плазменного потока это торможение и образование ударной волны происходит на расстоянии от 10^3 до 10^4 а. е., в зависимости от принимаемой концентрации частиц межзвездного водорода в пределах 0,1—1 $см^{-3}$. На самом деле образующаяся конфигурация является асимметричной вследствие скорости Солнца (около 20 км/с) относительно ближайших звезд (и соответственно межзвездного газа) — это известное движение в направлении к солнечному апексу, находящемуся в созвездии Геркулеса. Как следствие, в направлении вектора скорости Солнца ударный переход происходит ближе к центру, а в противоположном направлении (к антиапексу), наоборот, дальше. Тем не менее, приведенная выше оценка среднего характерного размера гелиопаузы остается справедливой.

Другим, более правильным критерием служит граница, на которой сила притяжения Солнца сравнивается с силой притяжения ближайших к нам звезд. Этот критерий приводит к оценке размера Солнечной системы порядка $1{,}5 \cdot 10^5$ а. е.

Как ни кажутся громадными такие расстояния по привычным земным представлениям, в масштабах Вселенной они совершенно ничтожны. Действительно, в звездной и галактической астрономии единицами измерения расстояний служат световой год и парсек. Парсек представляет собой расстояние, с которого большая полуось земной орбиты видна под углом в 1″ (или, другими словами, расстояние до звезды, годичный параллакс который равен 1″). Следовательно, расстояние, выраженное в парсеках (пс), является обратной величиной годичного параллакса; 1 пс = 206 265 а. е. (радиусов орбиты Земли), что составляет $30{,}86 \cdot 10^{12}$ км и равно 3,26 светового года. В этих единицах поперечник планетной системы составляет всего около 0,001 пс. Даже по отношению к поперечнику нашей Галактики («Млечному Пути»), близкому к 30 килопарсекам (30000 пс), это составляет всего несколько стомиллионных долей; а ведь со-

временная астрономия оперирует с расстояниями в Мега- и даже Гигапарсеки *)! Ближайшие к нам галактики, Большое и Малое Магеллановы Облака, удалены от нас на 55 килопарсеков (кпс), а знаменитая туманность Андромеды — на 0,7 Мпс. От самых же далеких галактик нас отделяют такие расстояния, что наблюдаемый сейчас от них свет был ими излучен еще до образования Солнца — свыше 4,5 млрд. лет тому назад!

Галактика имеет форму гигантской выпуклой линзы толщиной около 4 кпс, а наша Солнечная система находится на расстоянии около 10 кпс (33 тыс. световых лет) от ее центра в одном из спиральных рукавов (рис. 1). Галактика вращается, причем скорость вращения сначала возрастает с увеличением расстояния от центра, а затем уменьшается. Обращение Солнца вокруг центра Галактики происходит со скоростью около 240 км/с, так что один полный оборот оно совершает приблизительно за 200 млн. лет.



Рис. 1. Положение Солнечной системы в Галактике.

Наше Солнце, представляющее собой рядовую желтую звезду, принадлежащую согласно принятой классификации к спектральному классу G2, буквально затеряно среди многих миллиардов своих собратьев, находящихся на разных стадиях эволюции; в Галактике примерно 10^{11} звезд. Между тем относительно небольшая область пространства, занимаемая Солнечной системой, представляет для нас первостепенный интерес, поскольку именно здесь происходят процессы и явления, имеющие определяющее значение для Земли и ее ближайшего окружения. Преимущественно с этой областью связывается сейчас и понятие космоса, доступного непосредственному изучению на обозримый период времени, по-видимому, в течение нескольких ближайших столетий.

---

*) 1 Мегапарсек (1 Мпс) = 10^6 пс; 1 Гигапарсек (1 Гпс) = 10^9 пс.

С учетом приведенных нами соотношений размеров во Вселенной, может показаться парадоксальным, что до самого последнего времени о планетах нам было известно меньше, чем о звездах. Это касается в первую очередь строения, состава и особенно проблемы классификации планет по характерным признакам, отражающим ту или



Рис. 2. Схема полетов космических аппаратов к планетам. Орбиты аппаратов показаны прерывистыми линиями.

иную фазу эволюции, поскольку существующим инструментам пока не доступны наблюдения планет за пределами нашей Солнечной системы. Многочисленность же звезд позволила еще в начале нынешнего столетия выявить вполне определенные закономерности их физической природы и последовательности эволюционных стадий в соответствии с положением на диаграмме Герцшпрунга — Рессела, иллюстрирующей зависимость между светимостью и спектральным классом звезды.

Исходя из очевидных различий, отражающих особенности образования планетной системы, девять больших планет делят на две основные группы: планеты типа Земли, куда, кроме Земли, входят Меркурий, Венера, Марс, и планеты юпитерианской группы, или планеты-гиганты, к которой относят Юпитер, Сатурн,

Уран и Нептун. Под эту классификацию не подпадает Плутон, который по своим размерам и свойствам значительно ближе к спутникам планет-гигантов. К пяти планетам совершили полеты космические аппараты (рис. 2).

У всех планет, кроме Венеры и Меркурия, есть спутники. Общее число известных на сегодня спутников 41, включая недавно открытые 14-й спутник Юпитера, 15-й спутник Сатурна, 6-й спутник Урана и спутник Плутона. Подавляющее большинство спутников принадлежит планетам-гигантам. Наиболее крупными спутниками обладают Земля, Юпитер, Сатурн и Нептун. Это наша Луна, 4 ближайших спутника Юпитера, открытых в 1610 г. Галилеем и потому называемых галилеевыми (Ио, Европа, Ганимед, Каллисто), спутник Сатурна Титан и спутник Нептуна Тритон. По своим размерам эти спутники сопоставимы с планетами земной группы: Ио и Европа примерно такие же, как Луна (ее средний радиус $R_{☾}=1738$ км), а Титан, Тритон, Ганимед и Каллисто — как Меркурий (его средний радиус $R_{☿}=2439$ км).

Остальные спутники обладают размерами от нескольких десятков до нескольких сотен километров и, в отличие от более крупных тел, имеют неправильную (несферическую) форму. Это сближает их с другими аналогичными телами, движущимися вокруг Солнца, а именно малыми планетами, которые называют также астероидами, т. е. звездообразными объектами. В каталоги занесено около 2300 малых планет, в то время как общее число тел с размерами $\sim$1км оценивается величиной не менее 10^5. Их суммарная масса не превышает, однако, 0,001 доли массы Земли.

Подавляющее большинство астероидов занимает обширную кольцевую область пространства между орбитами Марса и Юпитера, на среднем расстоянии от Солнца 2,75 а. е. Поперечник самого крупного из астероидов — Цереры — достигает 1000 км, за ним идут Паллада, Веста и Гигея с размерами соответственно 608 км, 538 км и 450 км. Наряду с этой кольцевой областью, получившей название астероидного пояса, существуют группы астероидов со значительно более вытянутыми эллиптическими орбитами. Среди 34-х астероидов, пересекающих при своем движении орбиту Марса, выделяют 8 астероидов группы Аполлона, которые в перигелии заходят внутрь орбиты Земли, а Икар — даже внутрь ор-

биты Меркурия. В афелии ряд астероидов удаляется от Солнца на расстояние, превышающее радиус орбиты Юпитера. Такой характер движения сближает их с короткопериодическими кометами и делает обоснованным предположение, что некоторые из малых планет являются остатками (реликтами) кометных ядер, газовая компонента которых полностью исчерпана.

Большинство «хвостатых странниц» — комет, по-видимому, не принадлежит непосредственно области, ограниченной гелиопаузой, а расположено за ее пределами. Значительно ближе к Солнцу находится лишь несколько семейств комет; их афелии лежат в основном между орбитами Юпитера и Нептуна. В настоящее время вычислены элементы орбит около 600 комет, среди которых есть как короткопериодические (период обращения меньше 20 лет), так и долгопериодические (с периодом больше 20 лет). В то же время общее число комет оценивается величиной 10^{12}—10^{15}. Основное семейство, как предполагает большинство исследователей, среди которых голландский астроном Я. Оорт и американский астроном Ф. Уиппл, сосредоточено в области кометного облака, расположенного в галактической плоскости на расстоянии $\approx 10^5$ а. е. от Солнца. Это облако предположительно образовалось одновременно с формированием Солнечной системы, его суммарная масса считается не превышающей $\approx 10\ m_{\oplus}$ (массы Земли).

Существуют и другие гипотезы происхождения комет, среди которых заслуживает внимания «теория фокусировки». Предполагается, что при своем движении Солнце пересекает межзвездные газовопылевые облака, и отдельные крупные «сгустки» его фокусируются на солнечной траектории («оси аккреции»). Основанием здесь служит, в частности, известная концентрация перигелиев кометных орбит в окрестностях солнечного апекса и антиапекса. Между тем такая концентрация не противоречит и гипотезе облака, если принять во внимание вероятный эффект «трения» кометной материи о межзвездный газ. В рамках же гипотезы фокусировки труднее объяснить преобладание эллиптических, а не гиперболических кометных орбит и некоторые другие особенности, на которых мы не будем здесь останавливаться. Поэтому гипотеза кольцевого кометного облака, часто называемого облаком Эпика — Оорта, кажется сейчас более обоснованной.

Под действием возмущений ближайших звезд кометы из облака могут оказываться на орбитах, у которых расстояние в перигелии мало́, и проходить, таким образом, вблизи Солнца, где они достигают наибольшей яркости и их удается наблюдать. Подобным же образом наблюдаются короткопериодические кометы с более близкими афелиями. Хорошо известный светящийся в солнечных лучах хвост образуется за счет потери кометой ее массы. Максимальная потеря массы за один оборот у наиболее ярких комет оценивается величиной 0,2—0,5%, поэтому часто проходящие вблизи Солнца кометы не могут жить долго. В свою очередь истечение газов создает дополнительные возмущения, накладывающиеся на гравитационные возмущения Солнца и планет. Все это приводит к тому, что параметры кометных орбит (эксцентриситеты, наклонения) лежат в очень широких пределах. С этим связаны трудности прогнозирования и наблюдений этих небесных тел, внезапность их появлений. Интересно отметить, что возмущение в перигелии на расстоянии 1—2 а. е. оказывает на движение кометы больший импульс, чем торможение искусственного спутника Земли в перигее близкой эллиптической обиты. Это приводит к очень значительным изменениям афелийного расстояния. Между тем некоторые из появляющихся комет, испытав сильные возмущения вблизи перигелия, переходят с эллиптической на гиперболическую орбиту и навсегда покидают Солнечную систему.

Кроме рассмотренных нами тел, в межпланетном пространстве находится еще большое количество частиц разнообразных размеров, преимущественно очень мелких, с массой в тысячные и миллионные доли грамма. Их называют метеорной пылью. Образование этих частиц обусловлено по всей вероятности столкновениями более крупных тел (астероидов) и последовательными дроблениями на более мелкие осколки на всем протяжении существования и эволюции Солнечной системы. Определенный вклад может также вносить и самопроизвольное разрушение таких тел под действием температурных деформаций или быстрого собственного вращения.

Метеорная пыль непосредственно зарегистрирована как по вспышкам и путем радиолокационных отражений от оставляемых следов при вторжении в верхнюю атмосферу Земли, так и непосредственно в экспериментах на высотных ракетах, искусственных спутниках Земли и

межпланетных зондах. С ее существованием связано и такое хорошо известное явление, как зодиакальный свет — слабое диффузное свечение, симметричное относительно плоскости эклиптики. Оно наблюдается в виде расширяющихся к горизонту конусов вскоре после наступления темноты или перед рассветом и быстро убывает по мере увеличения углового расстояния от Солнца. Свечение это возникает благодаря рассеянию солнечного света на частицах пыли, захваченных на околосолнечные орбиты и образующих по современным представлениям облако в форме эллипсоида, одним из фокусов которого служит Солнце. Содержание пыли в таком облаке должно убывать с увеличением расстояния от Солнца и от плоскости эклиптики.

Вместе с тем ряд дополнительных эффектов существенно изменяет эту модель. Дело в том, что на распределение пыли, наряду с гравитационными силами, оказывают влияние силы радиационного давления от Солнца, механическое торможение, а также приобретаемый частицами электрический заряд. Под действием давления солнечной радиации мельчайшие частицы пыли «выдуваются» во внешние области Солнечной системы. Более крупные частицы (в единицы и сотни микрон) подвержены так называемому эффекту Пойнтинга — Робертсона, вклад которого сравним с механическим торможением межпланетным газом для частиц еще бо́льших размеров. Дополнительное торможение создается за счет кулоновских сил в электрическом поле и лоренцовских сил при взаимодействии с межпланетным магнитным полем.

Физическая сущность эффекта Пойнтинга — Робертсона состоит в следующем. Частица поглощает солнечные фотоны, движущиеся со скоростью света c радиально от Солнца и поэтому обладающие относительно его нулевым моментом количества движения. В то же время она излучает энергию равномерно во всех направлениях, т. е. изотропно, так что излучаемым фотонам частично передается импульс, которым обладает сама частица. В результате этого частица, у которой вектор скорости v и, следовательно, импульс направлены по касательной к ее траектории, приобретает в собственной системе координат дополнительную компоненту v/c, обусловленную радиационным давлением и направленную противоположно ее движению. Таким образом, за счет уменьшения момента количества движения частицы происходит посте-

пенное уменьшение радиуса ее орбиты, и она по спирали приближается к Солнцу — как говорят, «выпадает на Солнце». Другими словами, движение происходит не по кеплерову эллипсу, так как действующая на частицу сила нецентральна. Легко подсчитать «время жизни» частицы на околосолнечной орбите, если воспользоваться соответствующей простой формулой. Согласно теории, сферическая частица радиуса r и плотности ρ^*, первоначально находящаяся на почти круговой орбите радиуса a, выпадает на Солнце за время $t=7\cdot10^6\ r\rho^*a^2$ лет. Следовательно, для частицы с $r\simeq100$ мкм и $\rho^*\simeq3$ г/см^3, находящейся от Солнца на расстоянии $a\simeq1$ а. е., время жизни составит $t\simeq3\cdot10^4$ лет. На самом деле частица не достигает Солнца, а испаряется в его окрестности и входит в состав солнечной атмосферы. Очевидно, эффектом Пойнтинга — Робертсона в основном объясняется практически отсутствие пыли во внутренних областях Солнечной системы. Действительно, полеты межпланетных космических аппаратов не выявили сколь-нибудь заметного изменения ее содержания вплоть до орбиты Юпитера, включая (что крайне интересно!) область внутри астероидного пояса. Микрометеорные датчики аппаратов «Пионер» и «Вояджер» практически не обнаружили здесь изменения скорости счета, выявив небольшое возрастание концентрации только непосредственно вблизи самого Юпитера.

Заметим, что отдельные относительно небольшие области повышенной концентрации пылевой материи могут существовать в системе двух притягивающих центров (Солнце — планета, планета — спутник) в точках относительного равновесия — так называемых точках либрации, или лагранжевых точках. При этом устойчивыми являются только «треугольные» точки Лагранжа, равноудаленные от обоих центров, и они-то как раз и представляют наибольший интерес. Подтверждением такому предположению служит сообщение об обнаружении повышенного содержания пыли в окрестности этих точек для системы Земля — Луна, сделанное в 1961 г. польским астрономом К. Кордылевским.

В зону захвата Землей попадают частицы различной массы и размеров. Практически все они должны столкнуться с ней, поэтому заметной концентрации пыли вблизи Земли возникнуть не может. Это хорошо подтверждается серией экспериментов на спутниках, сущест-

венно уточнивших более ранние измерения и не подтвердивших представлений о пылевом поясе. Для большинства частиц столкновение их с Землей оканчивается испарением в верхней атмосфере (в основном на высотах более 80—120 км), но некоторое количество достигает земной поверхности в виде хорошо всем известных метеоритов и пыли. Совершенно очевидно, что чем крупнее тело, тем значительно меньше вероятность такого

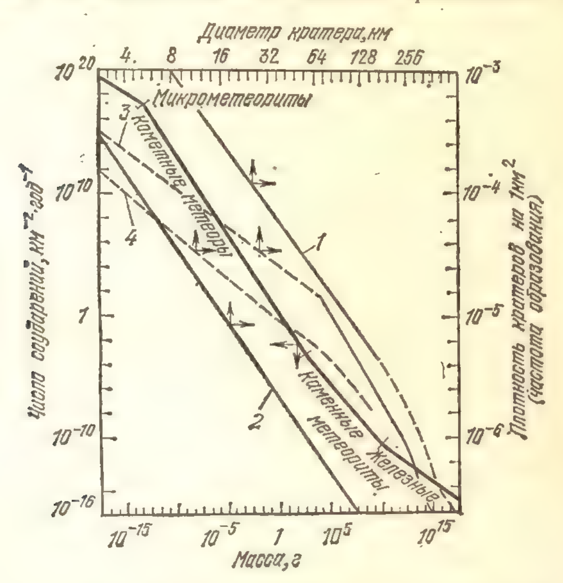


Рис. 3. Потоки метеорных тел в зависимости от массы (жирная кривая) и распределение плотности кратеров (на 1 км^2) в зависимости от их диаметра на Луне (*1* — для материков и *3* — для морей) и на Марсе (*3* — для морей и пустынь и *4* — для полярных областей). Стрелки указывают, к каким осям следует относить соответствующие кривые.

события. По существующим оценкам поток мельчайших пылевых частиц, идущий к Земле примерно изотропно, составляет по массе 10^{10} г/сутки, т. е. 10^4 т/сутки или около 0,1 т/с. Поверхность Земли $S=4\pi R_{\oplus}^2 \simeq 5\cdot 10^{18}$ см^2, скорости метеорных частиц лежат в диапазоне 11—72 км/с. Принимая среднюю скорость $v \simeq 30$ км/с, получаем, что плотность пылевой компоненты в околоземном пространстве составит

$$\rho = \frac{10^5 \text{ г/с}}{5\cdot 10^{18} \text{ см}^2 \cdot 3\cdot 10^6 \text{ см/с}} \simeq 5\cdot 10^{-21} \text{ г/см}^3.$$

Для сравнения укажем, что плотность земной атмосферы на высоте 1000 км $\rho \simeq 5 \cdot 10^{-19}$ г см^{3}, т. е. еще по крайней мере на два порядка больше.

Мы не случайно уделили столько внимания метеорным телам. Дело в том, что, помимо самостоятельного интереса, с ними непосредственно связаны общие проблемы эволюции более крупных космических объектов и, в частности, формирование поверхностей планет и астероидов.

Речь идет о частицах, попадающих в зону захвата более крупных небесных тел, предельным случаем которого является выпадение частицы на это тело (или метеороида на планету). Динамика сближения и столкновения рассматривается в рамках теории эллиптических орбит, обобщенной на гиперболические орбиты, что представляет специальный интерес. В свою очередь, распределение числа соударений в зависимости от массы, т. е. потоки метеорных тел различного размера и массы, можно представить в виде диаграммы, приведенной на рис. 3. Эта диаграмма получена на основе многолетних систематических наблюдений за метеорными телами, на основе палеоданных, теоретических экстраполяций, а в последнее время — и с учетом ставших доступными непосредственных исследований поверхностей планет и их спутников. Она применима не только для оценки потоков метеорных тел на Землю, но и прежде всего для оценок вероятностей столкновений с любым из интересующих нас небесных тел и тем самым для суждений о плотности и распределении по размерам кратеров на их поверхностях. Результаты соответствующего статистического анализа применительно к поверхностям Луны и Марса, проведенного В. Хартманом (кривые *1—4* на рис. 3), находятся в хорошем согласии с данной диаграммой. В разделе, посвященном поверхностям планет, мы вернемся к этим интересным вопросам.

Ничто во всей вселенной
Не существует, только их полет,
И он мои печали прочь несет
Полет планет, земли, и звезд полет,
и камня,
И мысль моя на жизни и на смерти —
На двух крылах, на двух волнах плывет.

Поль Элюар,
«Повторения», 1922

Глава II. ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ДВИЖЕНИЙ

Перейдем теперь к основной теме нашего рассказа о Солнечной системе — большим планетам. Мы начнем с их главных механических характеристик, на изучении которых были сосредоточены основные усилия многих поколений астрономов. Фундаментальное значение имеет прежде всего знание геометрических размеров, масс (и, следовательно, средней плотности), параметров орбитального движения планет и их спутников и параметров вращения. Последнее непосредственно связано с определением фигуры гравитирующего тела и пределов отклонения его гравитационного поля от сферической симметрии. В свою очередь знание фигуры и степени ее соответствия гидростатически-равновесной является определяющим при построении моделей внутреннего строения планет. Совокупности всех этих характеристик, среди которых обнаруживается ряд важных особенностей, неслучайно уделяется большое внимание: по существу все они играют важную роль в проблеме планетной космогонии.

РАЗМЕРЫ, МАССЫ, ВРАЩЕНИЕ

На рис. 4 показано расположение орбит и соотношение размеров планет, а их основные механические характеристики приведены в табл. 1, к которой мы будем

в дальнейшем постоянно обращаться. Из табл. 1 видно, что главное различие между двумя группами планет состоит в их размерах, массе и плотности. Различие в размерах составляет около полутора порядков величины,

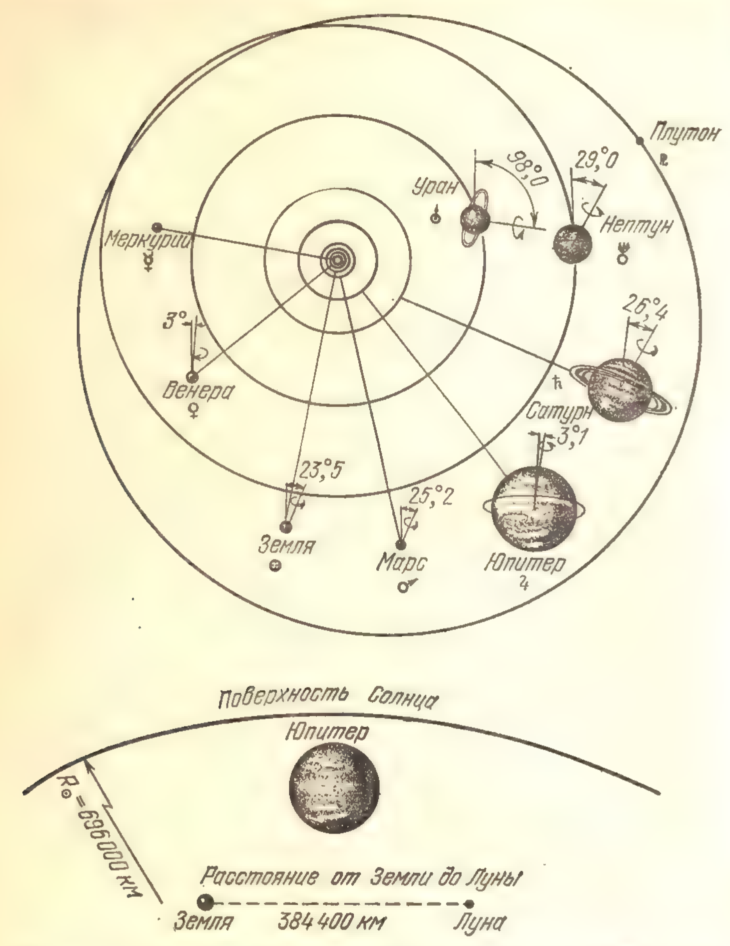


Рис. 4. Сопоставление орбит и размеров планет Солнечной системы.

а в массах — достигает почти четырех порядков. При значительно бо́льших размерах и массе планеты-гиганты обладают в 4—5 раз меньшей плотностью, чем планеты земной группы. Это объясняется различиями в

соотношениях трех основных типов вещества планет — газов, льдов и горных пород (среди них основное место занимают железо, силикаты и окислы магния, алюминия, кальция и других металлов).

Длительное время оптические наблюдения были единственным средством при определении геометрических размеров, параметров вращения и других характеристик планет. Положение планеты на орбите относительно наблюдателя на Земле характеризуется фазовым углом φ, образованным направлениями из центра планеты к Солнцу и Земле. У нижних планет, Меркурия и Венеры, фазовый угол меняется от 0° в верхнем соединении до 180° в нижнем соединении, когда планета максимально сближается с Землей и обращена к ней неосвещенным полушарием. Наилучшие условия наблюдений наступают в наибольших удалениях планеты от Солнца (наибольшие элонгации). Фазовый угол верхних планет (от Марса до Плутона) меняется от 0° в соединении и в противостоянии до некоторого наибольшего значения φ_m в квадратурах. Наилучшие условия наблюдений наступают в противостоянии (оппозиции) при наибольшем сближении планеты с Землей.

К сожалению, наземные оптические измерения имеют ограниченную точность, особенно при наличии у планеты атмосферы и облаков. Наиболее корректные результаты при определении геометрических размеров дает метод покрытий звезд, что помогло существенно уточнить, в частности, диаметры Нептуна и Плутона. Что касается вычисления массы, то оно особенно затруднено для Венеры и Меркурия из-за отсутствия у них спутников, а оценки по методу возмущений, оказываемому на ближайшие планеты, отягощены значительными погрешностями. Особенно большие трудности вызывает определение массы Плутона из-за малости его влияния на движение гораздо более массивных соседей. Очевидно, ранее полученные оценки массы этой планеты были сильно завышены, на что указывают новые данные наблюдений. В этом случае следует пересмотреть степень ее возмущающего эффекта на движение Нептуна; высказывается даже предположение, что сам факт открытия Плутона может быть отнесен за счет счастливой случайности.

Сенсационным явилось недавнее сообщение об открытии спутника Плутона по фотографиям, полученным

Таблица 1. Основные характеристики планет

Планета	Среднее гелиоцентрическое расстояние (большая полуось орбиты), а. е.	Эксцентриситет	Наклон орбиты к эклиптике	Сидерический период обращения (в земных годах)	Период вращения (в земных сутках, d, или часах, h)
Меркурий	0,387	0,206	7°,0	0,24	$58^d,6$
Венера	0,723	0,007	3°,4	0,62	243^d
Земля	1,000 ($1,5\cdot10^8$ км)	0,017	0	1,00 (365,26 сут)	$23^h,9$
Марс	1,524	0,093	1°,9	1,88	$24^h,6$
Юпитер	5,203	0,048	1°,3	11,86	$9^h,9$
Сатурн	9,539	0,056	2°,5	29,46	$10^h,2$
Уран	19,182	0,047	0°,8	84,01	$10^h,8$ ($24^h \pm 3^h$) *)
Нептун	30,058	0,009	1°,8	164,8	$15^h,8$ ($22^h \pm 4^h$) *)
Плутон	39,439	0,250	17°,2	247,7	$6^d,4$

*) Согласно последним данным.

американским астрономом Д. Кристи на 155-сантиметровом телескопе Морской обсерватории. Разрешение на фотографиях не позволяет выделить вблизи Плутона наличия иного тела, участвующего совместно с ним в орбитальном движении, а виден лишь небольшой выступ. Однако альтернативу гипотезе о спутнике трудно найти, ибо если бы такую форму имел сам Плутон, он давно был бы разрушен центробежными силами. Из анализа следует, что спутник обращается по орбите вокруг Плутона с периодом, равным периоду вращения самой планеты, на расстоянии ≈ 17 тыс. км от нее. Исходя из этого расстояния и оцененных расстояний до центра масс системы Плутон — спутник масса последнего получается порядка $\approx 1/30$ массы планеты. Это отношение почти втрое превышает отношение масс Луны и Земли (1/81) и означает, что спутник Плутона (получивший название Харон) должен оказывать значительно более сильное воздействие на планету. Если его существова-

Экваториальный радиус, км	Объем (⊕=1)	Масса (⊕=1)	Плотность, г/см³	Наклон экватора к плоскости орбиты	Направление вращения	$I = \frac{C}{MR^2}$	Альбедо	Эффективная температура, К	Число спутников
2 439	0,05	0,06	5,44	7°	Прямое	0,324	0,09	435	нет
6 051	0,90	0,82	5,24	177°	Обратное	0,332	0,77	228	нет
6 378	1,0	1,00	5,52	23°,5	Прямое	0,332	0,30	255	1
3 394	0,15	0,11	3,95	25,2	Прямое	0,377	0,20	216	2
71 398	1318	318	1,33	3,1	Прямое	0,200	0,42	134	14
60 000	755	95,1	0,68	26°,4	Прямое	0,220	0,50	97	15
25 400	63	14,5	1,27	98°	Обратное	0,230	0,50	54	6
24 750	58	17,3	1,62	29	Прямое	0,290	0,50	38	2
1 400	0,01	0,002	1—1,5		Прямое		0,60	32	1

ние в дальнейшем подтвердится, то будут все основания говорить не об отдельной планете Плутон, а о тесной двойной системе.

В уточнение массы, экваториального радиуса и средней плотности Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера и его галилеевых спутников решающий вклад внесли радиолокационные измерения и полеты космических аппаратов. Из анализа возмущающих эффектов на пролетную траекторию космического аппарата или орбиту искусственного спутника планеты значительно уточнены также параметры их гравитационных полей. В разложении гравитационного потенциала планеты по сферическим гармоникам определено несколько первых членов, характеризующих возмущающие эффекты за счет отличия поля от центрального. Одновременно значительный прогресс достигнут в определении фигур планет, степени их отличия от сфероида и ряда динамичес-

ких характеристик, непосредственно связанных с параметрами вращения.

Из табл. 1 видно, что при большой массе планеты-гиганты обладают наименьшими периодами вращения, вследствие чего линейные скорости на экваторе видимой поверхности велики (12,2 км/с у Юпитера, в то время как у Земли 0,46 км/с). Это обусловливает, в частности, значительно бо́льшие величины динамического сжатия этих планет по сравнению с планетами земной группы, определяемого как $\alpha=\frac{a-b}{a}$. Здесь a и b — большая и малая полуоси эллипсоида вращения, которому в первом приближении должна удовлетворять фигура вращающейся планеты, находящейся в состоянии гидростатического равновесия. Таким образом, величина α характеризует распределение плотности в ее недрах (для невращающейся планеты оно было бы сферически-симметричным). В свою очередь истинная фигура планеты определяется геометрическим сжатием $e=\frac{\bar{a}-\bar{b}}{\bar{a}}$, характеризующим реальную сплюснутость планеты и определяемую разницей экваториального $\bar{a}$ и полярного $\bar{b}$ радиусов. Величина полярного сжатия Юпитера составляет 4400 км, в то время как у Марса она около 25 км, а у Венеры не превышает нескольких сотен метров. Следует подчеркнуть, что если у Юпитера и Сатурна (как показали недавние результаты анализа измерений при пролетах космических аппаратов вблизи этих планет) e и α хорошо согласуются между собой, то у Луны, Венеры, Меркурия e и α заметно различаются. Со степенью сжатия связано распределение гравитационной потенциальной энергии небесного тела, или его гравитационный потенциал.

Марс вращается вокруг своей оси почти так же, как Земля: марсианские сутки всего на 41 минуту продолжительнее земных (средних солнечных суток). В то же время Венера и Меркурий вращаются чрезвычайно медленно, причем Венера — в направлении, обратном направлению движения по орбите. Из других планет аналогичной особенностью обладает лишь Уран, ось вращения которого лежит почти в плоскости его орбиты (см. рис. 4). У нижних планет — Венеры и Меркурия — происходит смена фаз, подобных фазам Луны, с периодом

в среднем 584 земных суток у Венеры и 116 суток у Меркурия (синодические периоды).

Проблема определения периодов вращения Венеры и Меркурия и их обращения вокруг Солнца (как, впрочем, и ряда других характеристик этих планет) имеет длительную историю. Это связано с тем, что поверхность Венеры в оптическом диапазоне не видна, а Меркурий очень трудно наблюдать из-за малости его угловых размеров (изменяющихся в пределах от 13″ до 5″) и небольших угловых удалений от Солнца, не превышающих 28°. Лишь за два последних десятилетия получены надежные значения этих характеристик радиолокацией планет.

Радиолокационные измерения Венеры были начаты в 1961 г. одновременно в Советском Союзе группой сотрудников Института радиотехники и электроники АН СССР под руководством В. А. Котельникова, в США сотрудниками Массачусетского технологического института и Калифорнийского технологического института и в Англии на обсерватории Джодрелл Бэнк. В ходе этих и последующих экспериментов измерялись частотный и временно́й спектры отраженного планетой радиосигнала, доплеровское смещение его частоты, интенсивность отраженного излучения и его деполяризация, а также время распространения сигнала. На основе измерений угловой скорости вращения планеты, которые проводились несколькими методами, определялись элементы ее вращения.

Большая серия экспериментов позволила получить значение периода вращения Венеры, которое рекомендовано в настоящее время Международным астрономическим союзом и составляет 243,0±0,1 земных суток (з. с). Недавнее зондирование на длине волны 39 см дало, по-видимому, несколько более точное значение 243,16 з. с. Данные многолетних фотографических и радиолокационных измерений параметров вращения Меркурия привели соответственно к значениям периода 58,644±0,009 з. с. и 58,65±0,1 з. с. Из анализа фототелевизионных изображений Меркурия, переданных в 1973 г. космическим аппаратом «Маринер-10», получен период 58,6461±0,005 з. с.

Газовым оболочкам Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна свойственно дифференциальное вращение, т. е. изменение периода вращения от зоны к зоне, что может

быть связано с динамическими процессами в атмосфере. На Юпитере тропическая зона атмосферы вращается быстрее полярной на 5 мин 11 с, т. е. различие составляет около 1%, в то время как величина этого эффекта на Сатурне достигает почти 5%. Для Юпитера, видимо, наиболее близок к истинному период, соответствующий вращению его магнитного поля и определенный по модуляции интенсивности и направлению поляризации собственного радиоизлучения планеты ($09^h55^m29^s,7 \pm 0^s,07$).

Совсем недавно С. Хейс и М. Белтон поставили под сомнение периоды вращения Урана и Нептуна, определенные еще в 1912 г. известными астрономами П. Ловеллом и В. Слайфером, а позднее Д. Муром и Д. Мензелом по наклону фраунгоферовых линий в спектрах отражения, вызываемому вращением планеты. Авторы пришли к этому выводу, проанализировав большой ряд собственных спектральных измерений на обсерватории Китт-Пик и пересмотрев заново ранние ряды наблюдений. Новые значения, показанные в табл. 1 в скобках, близки к удвоенным ранее определенным периодам вращения этих планет. Не исключено, что на полученные расхождения оказали влияние не только методические трудности проведения подобных измерений, но и реально существующая неоднородность вращения видимой поверхности планеты. Высказываются предположения, согласно которым эффект дифференциального вращения у Урана и Нептуна может оказаться еще более значительным, чем у Юпитера и Сатурна.

Вопросы фигур планет и степени их отличия от состояния гидростатического равновесия тесно связаны с проблемами внутреннего строения, и мы подробнее остановимся на этих вопросах позже. Пока лишь заметим, что наиболее интересная особенность фигуры наблюдается у Марса, у которого верхняя полусфера (по линии большого круга, наклоненного на $\approx 35°$ к экватору) более уплощена, чем нижняя, т. е. заметнее отличается от сфероида. Центр фигуры смещен относительно центра масс на 2,5 км в направлении 98° W и 57° S. Примерно аналогичной асимметрией фигуры обладает Венера. По данным радиолокации на длине волны 3,8 см сечение планеты в экваториальной плоскости аппроксимируется эллипсом, разность полуосей которого составляет $1,1 \pm \pm 0,4$ км (для сравнения укажем, что для Земли эта разность $<0,2$ км), а центр фигуры смещен относительно

центра масс на $1,5 \pm 0,3$ км в направлении на Землю в эпоху нижнего соединения.

Из-за сфероидальной формы планет, обусловленной вращением, их оси вращения не сохраняют своего положения в пространстве, а под действием гравитационных возмущений испытывают периодические колебания. К ним относятся хорошо известные прецессионные и нутационные колебания земной оси, которые возникают благодаря разности ускорений, оказываемых Луной и Солнцем на экваториальный пояс земного сфероида, наклоненный к плоскости земной орбиты и эклиптики на угол $23^{\circ},5$. Создаваемый результирующий момент силы стремится совместить экваториальную плоскость с плоскостью эклиптики, причем гравитационное воздействие от Солнца примерно в 2,2 раза меньше, чем от Луны, из-за его большего удаления. Поскольку Земля обладает большой массой и, подобно волчку, быстро вращается, такого поворота не происходит, но ориентация оси вращения (а значит, оси мира) в пространстве периодически изменяется: она описывает вокруг оси эклиптики поверхность конуса с углом раствора $23^{\circ},5$ (прецессирует), подобно оси волчка. Соответственно северный и южный полюсы мира описывают окружности на небесной сфере. Такое прецессионное движение происходит по часовой стрелке, с востока на запад, со скоростью $50'',3$ в год. Поэтому полный оборот вокруг оси эклиптики происходит за $\frac{360^{\circ}}{50'',3} = 25\,800$ лет,— период прецессии земной оси.

К этому нужно добавить, что поскольку плоскость лунной орбиты наклонена к плоскости эклиптики в среднем под углом $5^{\circ}09'$, она сама прецессирует вокруг оси эклиптики с периодом около 19 лет — это так называемая регрессия плоскости лунной орбиты. Кроме того, когда Солнце дважды в год (в марте и сентябре) и Луна дважды в месяц пересекают небесный экватор, их динамическое воздействие на экваториальный пояс земного сфероида не создает момента, стремящегося отклонить ось вращения. В совокупности все эти эффекты приводят к небольшим дополнительным колебаниям (нутации) земной оси. Поэтому полюсы мира на самом деле описывают вокруг полюсов эклиптики окружности, промодулированные частотой нутационных колебаний.

Наиболее характерным следствием прецессии является изменение положения звезд на небесной сфере в эк-

ваториальной системе координат. Так, например, в настоящее время северный полюс мира приближается к Полярной звезде. Их угловое расстояние составляет сейчас 50′, а к 2103 г. уменьшится до минимального значения 27′. Однако уже в 3000 г. оно увеличится до $\approx 5°$, а к 4200 г. северный полюс мира будет в $\approx 2°$ от α Цефея. Наконец, в 13 800 году ближайшей к северному полюсу мира яркой звездой (на расстоянии $\approx 5°$) станет Вега

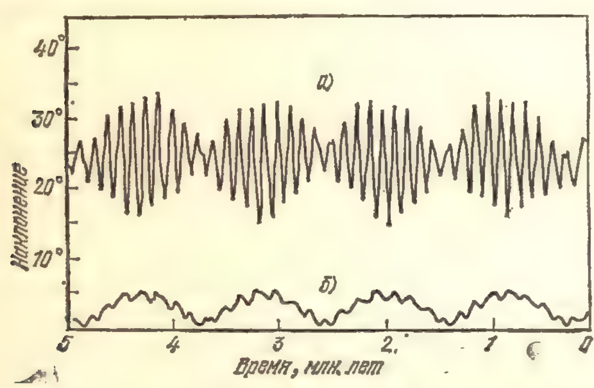


Рис. 5. Вариации наклонения экватора Марса с учетом прецессии оси вращения («а») и вариации наклонения плоскости марсианской орбиты («б») за последние 5 млн. лет. Современное значение 25°,2.

(α Лиры). Такая смена будет повторяться с периодом около 26 тыс. лет, но, конечно, угловые расстояния этих звезд от полюса мира будут несколько иными.

Прецессия и нутация — наиболее характерные и хорошо изученные формы движений земной оси. Предполагается также наличие других долгопериодических колебаний вследствие гравитационных возмущений, приводящих к изменению наклона оси вращения в пространстве. По расчетам советских ученых Ш. Г. Шараф и Н. А. Будниковой за последние 30 млн. лет наклон оси вращения Земли изменялся примерно от 22°,1 до 24°,6 с периодами около 40 и 200 тыс. лет.

Еще более сильные колебания относительно плоскости эклиптики, по-видимому, испытывает ось вращения Марса. Как показали расчеты американского исследователя В. Уорда, они могут быть обусловлены наложением трех эффектов: изменением наклонений плоскости

орбиты и экватора вследствие гравитационных возмущений планет-гигантов и прецессией самой оси вращения, вызываемой воздействием момента от Солнца на асимметричную фигуру планеты. В результате положение оси вращения в пространстве колеблется с периодом 120 тыс. лет, а амплитуда колебаний изменяется с периодом 1,2 млн. лет, как показано на рис. 5. При этом величина наклонения экватора i изменяется от 14°,9 до 35°,5, и современную величину 25°,2, приведенную в табл. 1, следует рассматривать как промежуточное значение.

СВОЙСТВА ОРБИТ

Характеристики движения планет определяют всю совокупность динамических свойств в Солнечной системе. Обращение планет вокруг Солнца подчиняется законам Кеплера, которые позволяют приблизительно определить положение планеты на невозмущенной орбите в любой момент времени. Чтобы перейти от приближенного к более точному определению положения (эфемериды планеты), необходимо учитывать возмущения в движении. Эти возмущения, приводящие к отклонениям от вычисленного эллиптического пути (кеплерова эллипса), возникают вследствие взаимного притяжения планет, зависящего от их расположения друг относительно друга и периодически изменяющегося с течением времени. Дополнительное возмущение обнаруживается в движении Меркурия, для которого из-за близости к Солнцу следует вводить поправки на смещение перигелия на 42″ в столетие, следующие из общей теории относительности. Нельзя, правда, исключить, что согласие данных наблюдений с величиной этого эффекта, теоретически предсказанного А. Эйнштейном, возможно является кажущимся и в пределах погрешности измерений ($\approx 1\%$) обусловлено действием квадрупольного момента Солнца, учитывающего в первом приближении отличие внешнего гравитационного потенциала Солнца от ньютоновского потенциала для идеальной сферы.

Элементы орбит испытывают долгопериодические возмущения, характер которых определяется аналитическими решениями уравнений движения и известными в классической небесной механике теоремами. Они, в частности, говорят о том, что поскольку движение практически целиком определяется гравитационными силами

(или, другими словами, сила, возмущающая движение небесного тела, консервативна, в отличие, например, от искусственного спутника, на который еще влияет сопротивление газа верхней атмосферы), большие полуоси и, следовательно, периоды обращения планет вокруг Солнца остаются неизменными. Что же касается эксцентриситетов и наклонений, то для верхних планет на пределы их изменений налагаются сильные ограничения, исходя из совокупных условий, связывающих эти элементы с другими характеристиками орбитального движения.

Определенные свойства орбитального и вращательного движений свидетельствуют о существовании ряда закономерностей, являющихся следствием распределения масс в динамической системе планет и спутников. При суммарной массе планет, немногим более одной тысячной доли от солнечной, на них приходится около 99,5% всего момента количества движения Солнечной системы. Спутники планет вносят в эту величину незначительный вклад. Все планеты движутся в направлении, совпадающем с вращением Солнца, их орбиты имеют малое наклонение к плоскости солнечного экватора и малые эксцентриситеты (за исключением Меркурия и особенно Плутона; см. табл. 1).

Наличие даже сравнительно небольшой эллиптичности орбиты вызывает заметные сезонные изменения за счет большей величины инсоляции в перигелии. Для Марса превышение составляет около 45%, а для Меркурия достигает двух раз. Однако основную роль в сезонных изменениях играет отклонение оси вращения от нормали к плоскости орбиты. Для Венеры, например, эксцентриситет и наклонение близки к нулю, и смены сезонов не происходит; в то же время для Марса оба фактора играют роль, приводя, помимо ярко выраженного сезонного хода, к различной длительности сезонов в северном и южном полушариях.

В расположении планет подмечена закономерность, известная под названием правила Тициуса — Боде, называемого также законом планетных расстояний. Согласно этому закону отношения больших полуосей последовательного ряда планет по мере их удаления от Солнца ($n=-\infty$ для Меркурия, $n=0$ для Венеры, $n=1$ для Земли и т. д.) почти постоянны, так что $a=0{,}1\cdot(3\cdot2^n+4)$ а. е. Это соотношение дает при значении $n=3$ положение пояса астероидов, по-видимому, представляющего собой

реликт стадии аккреции в виде несформировавшейся планеты. Одно время защищалась и прямо противоположная точка зрения; некоторые исследователи, наоборот, считали, что это обломки некогда существовавшей планеты, получившей название Фаэтон. Такая гипотеза впервые была высказана немецким астрономом Г. Ольберсом в 1804 г. вскоре после открытия им второй малой

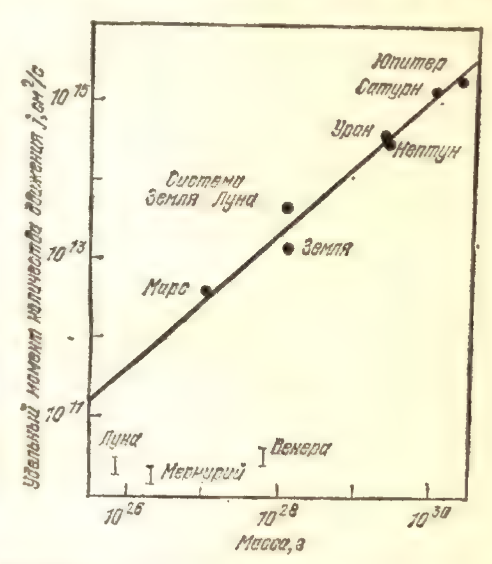


Рис. 6. Распределение удельного момента количества движения планет в зависимости от их массы.

планеты — Паллады. Гипотеза Ольберса была с энтузиазмом встречена современниками, поскольку позволяла реабилитировать закон планетных расстояний. Однако в дальнейшем, с ростом числа открытых астероидов, становилось все более очевидным, что все многообразие их орбит невозможно объяснить разрушением одной большой планеты и что более реально предположение о дроблении многих сравнительно крупных тел. Поэтому в настоящее время гипотеза о планете Фаэтон по существу отвергнута. На больших удалениях от Солнца закон планетных расстояний выполняется плохо: он обнаруживает заметное отклонение для Нептуна и совершенно не применим к Плутону.

Характерной особенностью является распределение удельного орбитального момента в планетной системе. Нетрудно убедиться в том, что он возрастает пропорционально корню квадратному из радиуса орбиты r, т. е. $J \sim r^{1/2}$, поскольку $J = mvr$, а круговая скорость $v = \left(\frac{Gm}{r}\right)^{1/2}$, где G — гравитационная постоянная.

Другой интересной особенностью служит наблюдаемая положительная корреляция скорости вращения планеты ω с ее массой m, т. е. чем больше масса, тем больше скорость вращения. Удельный вращательный момент (момент количества движения на единицу массы) выражается в виде $j = \frac{C\omega}{m}$, где C — момент инерции относительно оси вращения. Зависимость между j и m, показанная графически на рис. 6, соответствует пропорциональному соотношению $j \sim m^{5/6}$.

Исключение здесь составляют Венера и Меркурий, которые, по-видимому, в наибольшей степени подверглись действию приливного трения от Солнца. Что же касается Луны, то с точки зрения динамики следует рассматривать не отдельно Луну и Землю, а систему Земля—Луна, для которой соответствующая корреляция между моментом и массой оказывается достаточно хорошей.

В параметрах движений планет и их спутников выдерживается ряд интересных соотношений вследствие наличия соизмеримостей и резонансов. Постоянство обращения Луны к Земле одной стороной — характерный пример резонанса 1 : 1 между периодами обращения по орбите и вращения вокруг оси. Сюда же относятся синхронизация периодов вращения и обращения Меркурия (в резонансе 3 : 2), синхронизация вращения Венеры относительно Земли, соизмеримости в орбитальных движениях Плутона и Нептуна, Юпитера и Сатурна, трех галилеевых спутников Юпитера и четырех спутников Урана и т. д. Синхронизации вращений небесных тел с их орбитальным движением хорошо описываются законами Д. Кассини, установленными этим известным французским астрономом эмпирическим путем для вращения Луны еще в середине XVIII столетия и позднее обобщенными на более широкий спектр движений. Соизмеримости наиболее четко проявляются в так называемых средних движениях — параметре, связывающем силу

притяжения центрального тела, имеющего массу m, с большой полуосью орбиты a: $n=\sqrt{Gm/a^3}$. С ним непосредственно связан другой широко используемый в небесной механике параметр — средняя аномалия $M=n(t-t_п)$, где второй сомножитель представляет собой разность моментов времени прохождения планетой (или спутником) некоторой текущей точки орбиты и перицентра.

Как оказалось, существует несколько десятков пар тел, для которых отношения средних движений почти не отличаются от целых чисел и заключены в ограниченных пределах (преимущественно менее 7). Это обстоятельство, конечно, невозможно объяснить простым совпадением или случайностью. Подобная же закономерность проявляется в соотношении между средними аномалиями Ио, Европы и Ганимеда, между средними аномалиями и скоростями вращения Меркурия и Венеры, в наличии соизмеримостей между средними аномалиями Юпитера и Сатурна, вследствие чего относительное расположение этих планет повторяется с периодом 14 400 лет. Существующей соизмеримостью в движениях Нептуна и Плутона объясняется другое интересное свойство: эти планеты не могут сближаться на расстояние менее 18 а. е., несмотря на то, что в перигелии Плутон подходит к Солнцу ближе, чем Нептун (см. рис. 4).

Интересные динамические закономерности характерны и для орбит астероидов. У большинства из них найдены соизмеримости средних движений со средним движением Юпитера, неподалеку от которого расположено основное количество этих небесных тел. При этом оказалось, что астероиды распределены по группам с примерно одинаковыми средними движениями (а значит, и мало отличающимися большими полуосями орбит). В пространстве от 2,17 до 3,64 а. е., занимаемом астероидным поясом, обнаружено несколько областей, в которых астероидов практически нет, т. е. эти области как бы являются «запрещенными». Они получили название люков Кирквуда; в них периоды обращения кратны периоду обращения Юпитера, и заходящие сюда тела испытывают максимальные приливные возмущения.

У Земли и у всех верхних планет есть спутники, названия и основные характеристики которых приведены в табл. 2. С космогонической точки зрения наибольший интерес представляет факт несомненного сходства систем

Таблица 2. Основные характеристики спутников планет

Планета	Спутники		Средний радиус км *)	Масса (в массах планеты)	Плотность г/см³	Альбедо	Радиус орбиты в радиусах планеты	Радиус орбиты в 10^3 км	Период обращения (земные сутки)	Эксцентриситет	Наклонение, град.
Земля		Луна	1738	$1,23 \cdot 10^{-2}$	3,33	0,07	60,27	384,4	27,32	0,055	5,09
Марс		Фобос	13,5	$1,82 \cdot 10^{-8}$	2,1	0,06	2,76	9,38	0,319	0,015	1,02
		Деймос	7,5	$2,14 \cdot 10^{-9}$	2,1	0,07	6,92	23,46	1,262	0,001	1,82
Юпитер	XIV		20	$\sim 10^{-11}$			1,80		0,297		
	V	Амальтея	130	$\sim 10^{-8}$		0,10	2,55	181,3	0,489	0,003	0,4
	I	Ио	1820	$4,70 \cdot 10^{-5}$	3,53	0,62	5,95	421,6	1,769	0,000	0,0
	II	Европа	1565	$2,57 \cdot 10^{-5}$	3,03	0,68	9,47	670,9	3,551	0,000	0,5
	III	Ганимед	2640	$7,84 \cdot 10^{-5}$	1,93	0,44	15,1	1070	7,155	0,001	0,2
	IV	Каллисто	2420	$5,60 \cdot 10^{-5}$	1,79	0,19	26,6	1880	16,689	0,01	0,2
	XIII	Леда	~ 10	$\sim 2 \cdot 10^{-14}$			156	11110	240	0,146	26,7
	VI	Гималия	85	$\sim 4 \cdot 10^{-9}$		0,03	161	11470	250,6	0,158	27,6
	X	Лиситея	~ 20	$\sim 2 \cdot 10^{-12}$			164	11710	260	0,130	29,0
	VII	Элара	40	$\sim 4 \cdot 10^{-10}$		0,03	165	11740	260,1	0,207	24,8
	XII	Ананке	~ 15	$\sim 5 \cdot 10^{-12}$			291	20700	—617	0,17	147
	XI	Карме	~ 25	$\sim 10^{-11}$			314	22350	—692	0,21	164
	VIII	Пасифе	~ 25	$\sim 10^{-11}$			327	23300	—735	0,38	145
	IX	Синопе	~ 20	$\sim 5 \cdot 10^{-12}$			333	23700	—758	0,28	153

Сатурн	SXI		100			0,6	2,51	151,3	0,694	0,000	0,0
	X	Янус	100			0,6	2,65	159,5	0,749	0,000	0,0
	I	Мимас	195	$6{,}50\cdot10^{-8}$	1,2	0,6	3,09	186,0	0,942	0,020	1,5
	II	Энцелад	250	$1{,}48\cdot10^{-7}$	1,1	0,6	3,97	238,0	1,370	0,004	0,0
	III	Тефия	525	$1{,}09\cdot10^{-6}$	1,0	0,8	4,91	295,0	1,888	0,000	1,1
	IV	Диона	560	$2{,}04\cdot10^{-6}$	1,4	0,6	6,29	377,0	2,737	0,002	0,0
	V	Рея	765		1,3	0,6	8,78	527,0	4,518	0,001	0,4
	VI	Титан	2560	$2{,}46\cdot10^{-4}$	1,9	0,21	20,4	1222	15,95	0,029	0,3
	VII	Гиперион	155			0,47	24,7	1481	21,28	0,104	0,4
	VIII	Япет	720		1,2	0,35 0,05	59,3	3560	79,33	0,028	14,7
	IX	Феба	120			0,05	216,0	12930	−550,4	0,163	150
Уран	UVI		15	$\sim3\cdot10^{-10}$			2,45	57,6	0,417		
		Миранда	120	$1{,}0\cdot10^{-7}$			5,49	129,2	1,460	< 0,010	0,0
		Ариэль	300	$1{,}4\cdot10^{-6}$			8,08	190,1	2,555	0,003	0,0
		Умбриэль	200	$5{,}9\cdot10^{-7}$			11,25	264,7	4,015	0,004	0,0
		Титания	500	$7{,}0\cdot10^{-6}$			18,46	434,3	8,760	0,002	0,0
		Оберон	400	$3{,}2\cdot10^{-6}$			24,69	580,8	13,51	0,001	0,0
Нептун		Тритон	2200	$6{,}3\cdot10^{-4}$			15,85	394,7	−5,840	0,000	2,79
		Нереида	100	$5{,}0\cdot10^{-8}$			249,5	6212	358,4	0,749	0,48
Плутон		Харон (?)	560	$6{,}4\cdot10^{-2}$	1—1,5	0,6	12,15	17	6,4		

*) Для спутников нерегулярной формы указана половина максимального размера.

спутников планет-гигантов с самой планетной системой — систему Юпитера, например, можно уподобить Солнечной системе. Действительно, отношение суммарной массы спутников к массе планет по порядку величины соответствует отношению массы планет к массе Солнца ($\approx 10^{-3}$), орбиты большинства спутников также обладают малыми эксцентриситетами и наклонениями, а к их относительному расположению применим закон планетных расстояний. Следует особо подчеркнуть, что изучение системы планета-спутник имеет чрезвычайно важное значение для проблемы длительной эволюции небесного тела, особенно в случае взаимодействия, связанного с обменом энергией. Помимо синхронного относительно Земли вращения Луны в резонансе 1 : 1, подобные же особенности синхронизации (когда скорость вращения равна среднему движению n по орбите) обнаружены в движениях спутников Марса — Фобоса и Деймоса, галилеевых спутников Юпитера и, по-видимому, характерны также для других спутников планет, являясь еще одним замечательным свойством движений в Солнечной системе.

ПРИЛИВНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Наиболее убедительное объяснение синхронизаций, малости эксцентриситетов и наклонений орбит, а также существованию соизмеримостей в средних движениях планет и спутников дается в настоящее время, исходя из механизма приливного трения. В основе этого механизма лежит представление о диссипации энергии гравитационных возмущений в небесных телах из-за отсутствия в них идеальной упругости. В качестве простейшей меры отклонения от идеальной упругости используется так называемая диссипативная функция $1/Q$, характеризующая затухание для любого колебательного процесса и определяемая как доля механической энергии, которая рассеивается за колебательный цикл. Величина Q, называемая добротностью, служит мерой качества (резонансных свойств) колебательной системы и широко используется, например, в радиотехнике для характеристики колебательных контуров. Для контура с индуктивностью L, емкостью C и омическим сопротивлением R $Q=1/\omega RC$, где ω — собственная частота контура. Как видим, Q непосредственно зависит от частоты, хотя для

реальных горных пород, свойствами которых определяется «механическая добротность» системы, эта зависимость проявляется не очень сильно. Величиной добротности характеризуются также избирательные свойства колебательной системы: чем больше Q, тем у́же полоса частот внешней силы, способной вызвать колебания. По существу добротностью определяется, во сколько раз амплитуда установившихся вынужденных колебаний при резонансе превышает амплитуду вынужденных колебаний на частотах, не совпадающих с собственной частотой системы. Физическая природа диссипации в планетных телах очевидно связана главным образом с силами вязкого трения и несовершенством структуры кристаллических решеток (примеси, дислокации, неупорядоченности и др.). Для Земли, например, величина Q минимальна примерно на границе литосферы с астеносферой, между 50 и 100 км, составляя $Q \approx 100$ (такого порядка Q у радиоконтура), и быстро возрастает с глубиной, оставаясь примерно постоянной в нижней мантии ($Q \approx \approx 1000$). Для гигантов, как мы увидим, она должна быть значительно больше.

Жесткий верхний предел на величину диссипативной функции для планет накладывается расположением орбит их спутников. Для каждой из планет период обращения спутника больше периода вращения планеты; очевидно, чем больше диссипация, тем на более удаленную орбиту должен переходить спутник (как это, по-видимому, произошло с Луной). Действительно, в поле гравитационного потенциала передача момента количества движения от планеты к спутнику должна уравновешиваться моментом вращения, обусловленным влиянием спутника на планету. Если бы приливная реакция планеты на спутник была мгновенной, то полный момент вращения оказался равным нулю, поскольку приливное вздутие было бы всегда симметрично относительно линии планета-спутник. Между тем, как показано на рис. 7, вследствие неабсолютной упругости и диссипации энергии, будет иметь место фазовый сдвиг δ. Так как $\omega_{пл} > > \omega_{сп}$, максимальный приливный бугор у планеты образуется после прохождения линии планета — спутник. Спутник будет создавать противодействующий момент, стремящийся замедлить вращение планеты. В то же время воздействие бугра на спутник создает равный по величине и противоположный по направлению момент

вращения, вызывающий увеличение энергии и момента количества движения спутника. Результатом этого должно быть увеличение большой полуоси орбиты спутника и замедление скорости его движения.

Энергия вращения, теряемая Землей, составляет довольно внушительную величину $2{,}8 \cdot 10^{19}$ эрг с (для сравнения напомним, что Земля получает от Солнца $1{,}7 \cdot 10^{24}$ эрг с, мощность атмосферной циркуляции оценивается приблизительно в $2{,}4 \cdot 10^{22}$ эрг с, энерговыделение во время мощных магнитных бурь и полярных сияний составляет около 10^{19} эрг с, а мощности крупнейших современных электростанций $<10^{17}$ эрг с).

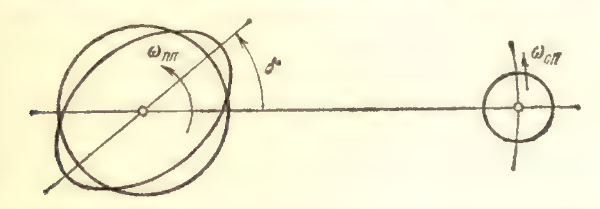


Рис. 7. Схема образования у вращающейся планеты приливного бугра и его запаздывания при движении спутника.

Расчеты показывают, что основная часть замедления вращения Земли, составляющая около 3,5 мс за столетие, обусловлена океаническими приливами (на самом деле замедление меньше, около 2 мс, поскольку одновременно происходит ускорение вращения примерно на 1,5 мс за столетие, причины которого пока не ясны). Значительная доля энергии, видимо, диссипирует также за счет твердотельного трения между отдельными блоками в коре и мантии Земли.

По измерениям земных приливов найдено, что торможение вращения Земли за счет приливного трения соответствует величине $Q \approx 15$. Поскольку скорость диссипации энергии определяется средней скоростью работы, производимой Луной на Земле и соответственно Землей на Луне за колебательный цикл, можно получить оценку влияния приливного трения на эволюцию лунной орбиты. При этом оказывается, что за счет приращения энергии движения большая полуось лунной орбиты увеличивается примерно на 3 см год, одновременно незначительно изменяются ее эксцентриситет и наклонение. Если теперь допустить, что приливная характеристика,

мерой которой служит функция Q, сохранялась за геологическую эпоху неизменной, можно прийти к представлению о том, что около 1,5 млрд. лет назад Луна находилась вблизи Земли и ее орбита имела заметно большее наклонение к плоскости земной орбиты. Поскольку результаты анализа лунных пород убедительно свидетельствуют о значительно более древнем возрасте, видимо соответствующем возрасту Земли, предположение о сравнительно «недавнем» образовании Луны исключается. Также маловероятной кажется гипотеза о «причаливании» Луны к Земле около 1,5 млрд. лет назад; поэтому, скорее всего, следует предполагать наличие существенно меньшей величины приливной диссипации по сравнению с современной эпохой.

Итак, под действием приливного трения во вращающейся планете должно происходить возрастание больших полуосей орбит ее спутников, которые постепенно удаляются от планеты. За счет гравитационного взаимодействия передается момент количества движения от одного спутника к другому, их периоды обращения становятся взаимосвязанными и возникают соизмеримости средних движений. С учетом относительно близкого расположения спутников Юпитера и других планет-гигантов, свидетельствующего о более слабой диссипации, чем для Земли, нижние пределы фактора Q оцениваются для них величиной $\approx 10^4$ (такого порядка добротность у камертона). Дополнительно экспериментальное подтверждение важной роли механизма приливного трения совсем недавно получено для галилеевых спутников Юпитера. При этом выявились феноменальные эффекты, объясняемые приливной диссипацией для Ио, которые мы рассмотрим в разделе, посвященном поверхностям планет.

Аналогичную природу имеет и механизм синхронизации относительно оси вращения спутника планеты или самой планеты, приводящий к совпадению (или соизмеримости) средней скорости вращения со средним движением n. Уменьшение угловой скорости происходит здесь под действием восстанавливающего момента, действующего на приливный бугор спутника. Восстанавливающий момент пропорционален отношению разности экваториальных моментов инерции A и B к полярному C. В общем случае спутника, находящегося на эллиптической орбите с заметным эксцентриситетом, момент вращения,

создаваемый притяжением приливного бугра планетой, будет стремиться приблизить скорость его вращения к угловой скорости в перицентре. По мере замедления вращения уменьшается запаздывание бугра вдоль орбиты, и соответственно передача момента количества движения. В пределе, когда угловые скорости вращения и движения по орбите практически уравниваются, переноса момента нет, происходит только обмен приливной энергией.

Обратимся теперь снова к вращению вокруг оси двух нижних планет — Венеры и Меркурия. Мы уже говорили о том, что потребовалось немало времени и усилий, прежде чем с высокой точностью были, наконец, определены их совершенно необычные периоды вращения. Однако необычность их не только в том, что обе эти планеты вращаются крайне медленно. Полученные значения представляют огромный интерес и с точки зрения проявления закономерностей, опять же обусловливаемых механизмом приливного трения.

Период вращения Венеры оказался очень близким к периоду резонансного вращения планеты относительно Земли, который равен 243,16 суток. При этом в каждом нижнем ($\varphi=180°$) и верхнем ($\varphi=0°$) соединении Венера обращена к Земле одной и той же стороной. При обратном направлении вращения это соответствует продолжительности солнечных суток на Венере 116,8 земных, т. е. венерианский год состоит примерно из двух венерианских солнечных суток.

Резонансное относительно Земли вращение Венеры, очевидно, вызывается действием гравитационного притяжения Земли на несимметричную фигуру Венеры. Однако для устойчивости состояния резонанса необходимо, чтобы стабилизирующий момент Земли $T_{\oplus}$ был больше приливного момента Венеры в гравитационном поле Солнца $T_{\odot}$. Это означает, что найденная асимметрия фигуры Венеры должна быть достаточна для обеспечения разности моментов инерции относительно экваториальных осей A и B, необходимой для выполнения условия $T_{\oplus}>T_{\odot}$. Вместе с тем относительная ширина резонансной зоны у Венеры оказывается чрезвычайно малой, существенно меньше, чем у Луны или Меркурия. Исходя из обобщенных законов Кассини, В. В. Белецким и С. И. Трушиным было показано, что для сохранения движения в пределах резонансной зоны при наличии перио-

дических солнечных возмущений необходимо выполнение условия $\frac{B-A}{C} \lesssim 2{,}5 \cdot 10^{-5}$. Аналогичное отношение для Луны имеет порядок $\approx 5 \cdot 10^{-4}$, откуда следует, что данное условие является весьма критичным, и феномен резонансного вращения Венеры, что называется, лежит «на пределе возможного».

Дополнительным фактором, способствующим синхронизации вращения Венеры Землей, могли бы быть атмосферные приливы. Кроме того, американские ученые Т. Голд и С. Сотер обратили также внимание на возможную роль суточных вариаций давления в мощной атмосфере Венеры за счет нагрева Солнцем. Действительно, минимальные давление и масса приходятся на послеполуденную, а максимальные — на дополуденную области атмосферы. Такое распределение масс создает в гравитационном поле Солнца момент $T'_{\odot}$, пропорциональный периоду вращения планеты и противоположный по знаку моменту $T_{\odot}$, т. е. ускоряющий ее вращение. Это уменьшает влияние тормозящего приливного момента Солнца и облегчает синхронизацию Венеры Землей. Уточненное условие синхронизации приобретает в этом случае вид: $T_{\oplus} > T_{\odot} - T'_{\odot}$.

Предположение о синхронном вращении Меркурия, т. е. о равенстве периодов его вращения и обращения, было выдвинуто еще в конце прошлого столетия Скиапарелли по наблюдениям отсутствия видимого смещения отдельных пятен на диске планеты относительно терминатора и подкреплено рядом более поздних исследований, вплоть до середины 60-х годов. Найденное уточненное значение периода вращения не противоречит утверждению о синхронном вращении, поскольку период около 88 суток не является единственным. Г. Коломбо был первым, обратившим внимание на то обстоятельство, что в случае неизотропного момента инерции планеты возможен устойчивый режим, при котором период вращения составляет 2/3 от орбитального периода, или 58,6461 з. с. Это интересный вариант резонанса в спиновых колебаниях, при котором за счет приливного взаимодействия планеты с Солнцем могла произойти передача ее углового момента, и соответственно уменьшение скорости вращения и «захват» в существующий резонансный режим. Подробное теоретическое рассмотре-

ние этого интересного эффекта было проведено в работах американских ученых Г. Коломбо и И. Шапиро, П. Голдрейха и С. Пила и советского ученого В. В. Белецкого.

Существенно подчеркнуть, что для возникновения у Меркурия спиново-орбитального резонанса 3 : 2 требуется весьма незначительная величина сжатия эллипсоида инерции в плоскости экватора, порядка $(B-A)$ $C>10^{-5}$. Отклонение от строго концентрического распределения массы вблизи этой плоскости, возможно, обусловлено гравитационными аномалиями, подобными районам на Луне с повышенной концентрацией масс. Их называют масконами. Наибольший из гипотетических масконов Меркурия ассоциируется с огромной (поперечником 1300 км) котловиной Калорис, всегда обращенной к Солнцу в перигелии орбиты.

Определяемая совокупным действием вращения и обращения по орбите длительность солнечных суток на Меркурии оказывается равной трем звездным меркурианским суткам, или двум меркурианским годам, и составляет 175,94 з. с. Интересно, что из-за большого эксцентриситета орбиты Меркурия суточное движение Солнца в небе этой планеты неравномерно. Наиболее медленно оно движется, когда планета находится в афелии. В перигелии, где угловая скорость орбитального движения планеты превышает скорость ее вращения, суточное движение Солнца (в общем происходящее с востока на запад) кратковременно становится попятным. Это необычное явление продолжается приблизительно 8 з. с.

Сравнительно недавно американскими исследователями Т. Флендерном и Р. Харрингтоном была предпринята попытка найти объяснение несколько необычной орбите Меркурия и его квазирезонансному вращению в рамках уже выдвигавшейся ранее гипотезы, согласно которой Меркурий когда-то был спутником Венеры, подобным Луне у Земли. По результатам моделирования на ЭВМ авторы получили подтверждение возможности реализации ситуации, при которой Меркурий, находившийся на первоначальной орбите со средним расстоянием ≈460 тыс. км, от Венеры, должен был в силу приливного взаимодействия постепенно замедлить собственное вращение и одновременно довести вращение Венеры до обратного. В этой динамической модели Меркурий в течение нескольких сот миллионов лет мог покинуть Венеру, уйдя на гелиоцентрическую орбиту из ее гравитационного

поля через одну из лагранжевых точек, лежащих на прямой, соединяющей оба центра масс.

Еще одна интересная идея, также рассмотренная путем численного моделирования на ЭВМ Харрингтоном и Флендерном, связана с попыткой объяснения орбиты Плутона и его спутника. Уже давно высказывалось предположение, что Плутон — это убежавший спутник Нептуна. Была рассмотрена модель, согласно которой это убегание произошло вследствие возмущения, которому подверглась система спутников Нептуна от неизвестной планеты с массой ≈ 10 масс Земли. При прохождении вблизи Плутона планета должна была сама испытать сильное возмущение, что отбросило ее на расстояние порядка 50—100 а. е. от Солнца, где она возможно находится и сейчас. Теоретически такая ситуация возможна, и количественно ее принципиальная реализуемость при указанных предположениях подтверждается расчетами. Однако никаких более весомых обоснований в пользу этой интересной идеи пока нет, и прежде всего по-прежнему нет каких-либо данных о существовании десятой планеты Солнечной системы за орбитой Плутона. Мы говорим «по-прежнему», поскольку подобная гипотеза была выдвинута еще около 15 лет назад, исходя из факта систематически регистрируемых расхождений в движениях Урана и Нептуна, предсказываемых теорией и получающихся из наблюдений. Если бы такая планета, как предполагалось, имела массу, приблизительно равную массе Юпитера, и была удалена от Солнца на 60 а. е., она должна была бы наблюдаться как объект не слабее 14 звездной величины. Тем не менее регулярные поиски с возможностью выявления даже значительно более слабых объектов не дали никаких результатов. Нельзя, впрочем, исключить того, что эта гипотетическая заплутоновая планета обладает очень низкой отражательной способностью (альбедо), удалена еще дальше от Солнца и находится на еще более необычной орбите, чем предполагавшаяся орбита с наклонением порядка 120°.

НЕКОТОРЫЕ КОСМОГОНИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

Рассмотренные нами закономерности в системе планет и спутников вполне определенно указывают на единый процесс их формирования и позволяют составить некоторые представления о наиболее вероятных путях и

механизмах этого процесса. Современные космогонические теории, включающие в себя две кардинальные проблемы — происхождение протопланетной туманности и образование планет,— опираются как на механические характеристики тел Солнечной системы, так и на новые экспериментальные данные о свойствах поверхностей и составе вещества планет в сопоставлении с образцами материала их зародышей — метеоритов. Важнейшую роль играют также успешно разрабатываемые теоретические методы моделирования излучающего газа и космической плазмы и, конечно, общие громадные успехи астрофизики и звездной космогонии.

Одна из первых серьезных попыток объяснения основных закономерностей происхождения Солнечной системы была предпринята крупным советским геофизиком О. Ю. Шмидтом в рамках его космогонической теории, энергично разрабатывавшейся в 40-х годах одновременно с теорией К. Вейцзеккера. В этих теориях получили существенное развитие выдвинутые еще в середине XVII в. Рене Декартом и во второй половине XVIII столетия Иммануилом Кантом и Пьером Лапласом концепции об образовании планет из холодного протопланетного пылевого вещества и из газовой туманности. Поскольку туманность по-латыни «небула», то такие гипотезы часто называют небулярными.

О. Ю. Шмидт рассматривал движение всех планет в одном направлении по круговым орбитам, лежащим приблизительно в одной плоскости, как следствие естественного статистического осреднения момента количества движения многих тел, из объединения которых возникали планеты. Закон планетных расстояний получался при этом исходя из первоначального распределения массы первичного вещества, в то время как у Вейцзеккера он определялся масштабом турбулентности в газовом диске с массой $\approx 0,1$ массы протосолнца. Обе теории не позволяли, однако, объяснить наблюдаемого распределения момента количества движения в Солнечной системе без привлечения искусственного предположения о захвате Солнцем межзвездного пылевого облака (протопланетной туманности), уже обладавшего необходимым моментом. Хотя такой захват в принципе возможен, вероятность его мала, что было уязвимым местом этих теорий.

Стремление обойти эту трудность привело английского астрофизика Ф. Хойла к предположению о меха-

низме передачи солнечного момента импульса планетам на стадии их формирования при взаимодействии, обусловленном сильным магнитным полем протосолнца. Такое магнитное сцепление одновременно должно было замедлить вращение Солнца, а перераспределение момента по всему радиусу протопланетного диска предполагалось за счет турбулентного трения. Однако при этом не учитывались различные возмущения в плазме, нарушающие указанный характер взаимодействия. Поэтому практическая осуществимость данного механизма также была поставлена под сомнение.

В работах Хойла нашли свое выражение представления об одновременном образовании Солнца и протопланетного облака и идея так называемой ротационной неустойчивости, в дальнейшем интенсивно развивавшаяся известными космогонистами А. Камероном и Э. Шацманом. В основе ее лежит процесс выделения Солнца из первоначального сгустка межзвездного вещества, обладающего большим моментом количества движения, в результате коллапса центрального сгущения из-за возникшей неустойчивости. Образование планет происходит вследствие распада тонкого вращающегося диска, отделившегося от этого сгущения под действием центробежной силы. Камерон допускает, что первоначальная масса протопланетной туманности должна была быть порядка солнечной, а отделение вещества началось на расстоянии, приблизительно вдвое превышающем радиус орбиты Плутона. У Шацмана обе величины примерно на два порядка меньше, т. е. выделившееся Солнце вначале обладало сравнительно небольшой массой, а отделение туманности произошло в районе орбиты Меркурия.

В модели Камерона предполагается, что температура отделившегося газового диска была высокой, вероятно свыше 2000 К, но в дальнейшем, после прекращения сжатия, происходило его интенсивное остывание, главным образом за счет излучения. На этом начальном этапе конденсации образовывались частицы твердого вещества, и туманность превращалась в газово-пылевую. С ростом светимости и потоков корпускулярного излучения молодого Солнца частично выметался материал, из которого аккумулировались большие и малые планеты. Особенно большая потеря вещества Солнца и протопланетной туманности часто связывается с периодом прохождения свойственной молодым звездам стадии Т Тельца,

когда резко возрастает их активность и теряется почти половина начальной массы звезды (интенсивность солнечного ветра увеличивается в несколько миллионов раз). При этом за счет протонного облучения протопланетной туманности могли образоваться легкие короткоживущие изотопы, такие как ^{26}Al, ^{10}Be, о роли которых мы расскажем позднее. Хотя обычно полагают, что эта стадия наступила к моменту завершения основной фазы формирования планет, тем не менее сам факт выметания требует допущения, что начальная масса туманности значительно превышала нынешнюю массу тел, населяющих Солнечную систему.

Однако при массе порядка солнечной возникают трудности с передачей углового момента за сравнительно короткое время. Поэтому в качестве альтернативной Камерон рассмотрел модель отделившейся туманности с массой $\approx 0,1$ солнечной, на которую сотни тысяч лет спустя после выделения Солнца продолжало аккретировать вещество ее внешних областей. Несколько иной подход принадлежит известному шведскому физику Х. О. Альфвену, согласно которому первоначального протопланетного диска не существовало, а планеты образовались за счет выпадения на протосолнце межзвездного газа и пыли, закрутки вещества в магнитном поле и ионизации «по слоям». В этом случае, однако, распределение масс должно было бы оказаться противоположным существующему в Солнечной системе, поэтому Альфвен считает, что планеты образовались не из этого основного ионизованного вещества, а из примесей, что уже выглядит довольно искусственным. Отличительной чертой модели Шацмана служит допущение о том, что все части отделившейся протопланетной туманности вначале обладали одинаковыми угловыми скоростями, а в дальнейшем, двигаясь почти радиально от Солнца, увеличивали свой момент количества движения. В рамках этого механизма делаются попытки объяснить замедление вращения горячих звезд, образующихся в хаотических областях межзвездных облаков типа туманности Ориона, и возможность передачи момента импульса планетам.

Большую популярность в планетной космогонии получила идея о том, что образование протопланетной туманности произошло под воздействием взрыва сверхновой звезды в окрестности компактного газового обла-

ка (следствие фрагментации более массивного газового скопления), из которого возникла Солнечная система. В этом случае удается наиболее убедительно объяснить найденные аномалии изотопного состава ближайших среди метеоритного вещества аналогов солнечного состава — углистых хондритов, которые можно отнести за счет инжекции материала при взрыве. На присутствие рожденного вероятнее всего в этом процессе ^{26}Al указывают, в частности, наличие его дочернего изотопа — магния ^{26}Mg и обогащенность вещества этих метеоритов включениями алюминия и кальция, в которых он равномерно распределен. Этой идее благоприятствуют также данные астрономических наблюдений. Они свидетельствуют о необходимости избыточного внешнего давления, чтобы вызвать гравитационный коллапс диффузного облака, подобного родительскому облаку Солнечной системы, и отделение диска. Такое избыточное давление могло быть обеспечено за счет ударных волн, порожденных взрывом сверхновой звезды.

Проблема аккумуляции планет, после того как протопланетная туманность уже сформировалась, разрабатывалась в нашей стране под непосредственным влиянием идей Шмидта и получила наибольшее развитие в работах его учеников и последователей. Л. Э. Гуревичем и А. И. Лебединским, В. С. Сафроновым, Б. Ю. Левиным изучалась динамика гравитирующих тел после развития возмущений в тонком газово-пылевом диске и его распада вследствие возникновения гравитационной неустойчивости, а также последовательность аккреции вещества на телах промежуточных размеров — зародышевых сгустках и постепенное вычерпывание ими более мелких тел в процессе эволюции роя. Важную роль в процессе такой аккумуляции могли играть турбулентные вихри, за счет которых частицы ускорялись и легче объединялись в «кольца» вещества (по теории Сафронова).

Менее 10 лет назад были начаты эксперименты по численному моделированию на ЭВМ процесса аккумуляции планет. Эксперименты американских ученых С. Доула, К. Сагана и Р. Исакмена привели к выводу о принципиальной возможности образования зародышей из однородных твердотельных частиц — планетезималий и возникновения соизмеримостей в расположении и параметрах орбит, а также о множественности морфологии планетных систем, зависящей от ряда исходных предпо-

ложений. Этот последний результат, воспроизведенный на рис. 8, имеет особенно большой интерес, давая нам представления о существующем расположении и массах планет Солнечной системы как об одной из возможных реализаций (вторая схема на рис. 8) среди других, примерно равновероятных. Тем самым он свидетельствует

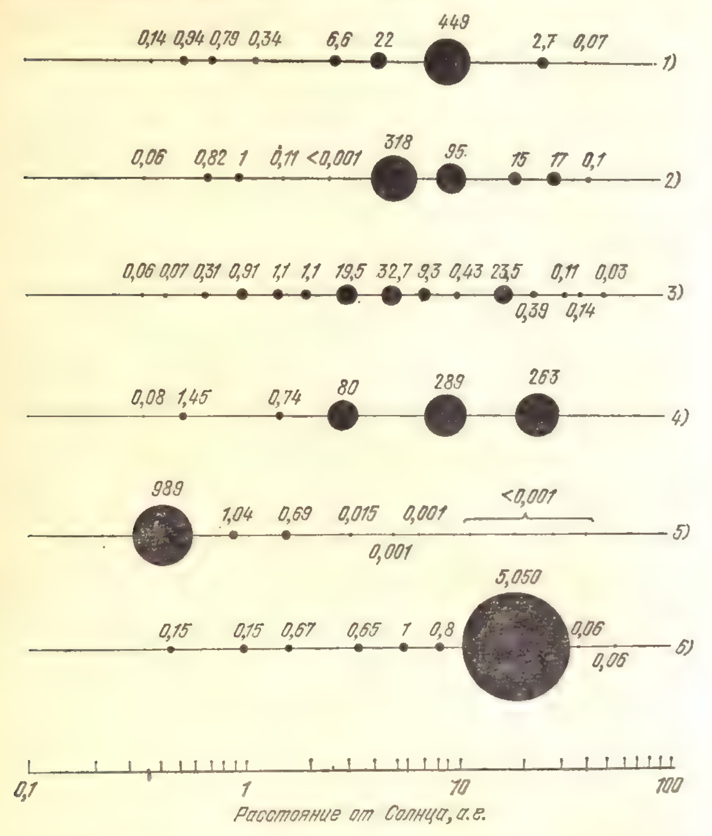


Рис. 8. Расчетные модели морфологии планетной системы (по К. Сагану и Р. Исакмену). Вариант 2) соответствует Солнечной системе.

о большом морфологическом разнообразии планетных систем, которые можно ожидать встретить во Вселенной.

Принципиально новый подход в теории формирования планетных и спутниковых систем развивается в последние годы советскими исследователями Т. М. Энеевым и Н. Н. Козловым. Авторы рассмотрели эволюцию

плоского протопланетного облака в процессе тесных сближений пар тел, движущихся по кеплеровским орбитам в поле притяжения Солнца. Основной отправной концепцией этой математической модели являются обнаруженный в результате численных расчетов эффект кольцевого сжатия вещества облака и образование (коагуляция) первоначально «рыхлых» газово-пылевых сгустков, заполняющих значительную часть своей сферы притяжения и медленно сжимающихся за счет внутренних гравитационных сил. При этом оказалось, что сам эффект кольцевого сжатия не зависит от размеров и масс начальных тел облака, или, как говорят, инвариантен по отношению к ним. К тому же отпадает необходимость в обычно использовавшемся допущении о значительных эксцентриситетах частиц протопланетного облака в схеме вычерпывания. Однако устойчивость таких рыхлых тел требует дополнительного обоснования.

В рамках этого подхода был выявлен некоторый общий критерий формирования планетных систем, что позволило лучше понять смысл эмпирического закона Тициуса — Боде. Одновременно с этим обнаружена глубокая связь между процессом формирования орбит и масс планет и характером их собственного вращательного движения. В частности, найдена четкая корреляция между малой массой Меркурия и очень малым вращательным моментом Венеры, что уменьшает обоснованность упоминавшейся гипотезы Флендерна и Харрингтона о Меркурии как спутнике Венеры. Получено, в частности, достаточно простое объяснение существования прямого и обратного вращений планет через систему прямых и фронтальных ударов астероидоподобных тел на завершающей стадии аккреции.

В теории Энеева и Козлова приливная эволюция вращательных движений планет на ранней стадии должна была происходить несравненно быстрее, чем сейчас. В процессе дальнейшего сжатия до современных размеров изменение периодов вращения и наклонений осей закономерно привело к существующим у всех планет, включая Венеру и Уран, значениям. Для Венеры ситуация в этих исходных посылках была подробно рассмотрена В. В. Белецким и его коллегами. Авторы пришли к выводу, что «протовенера», обладая с момента образования обратным вращением, могла захватиться в резонансное вращение за первые 10^7—10^8 лет своего суще-

ствования. Под действием приливных сил последующая эволюция шла в направлении медленного опрокидывания из обратного вращения в прямое, однако за тот же промежуток времени отклонение оси вращения от обратного оказалось в пределах 2°, а в дальнейшем еще более уменьшилось. Таким образом, Венера успела захватиться в резонансное вращение, но не успела опрокинуться. Привлекательность этого анализа состоит не

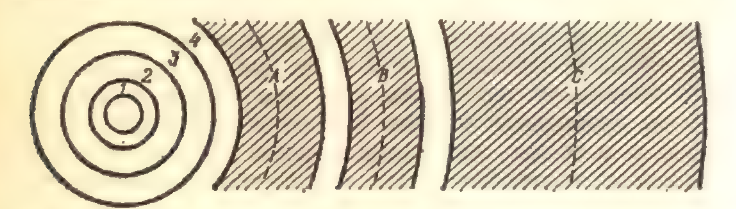


Рис. 9. Расположение внешних астероидных поясов (по модели Т. М. Энеева); *1—4* — орбиты Юпитера — Нептуна, прерывистые линии — средние линии поясов.

только в отсутствии необходимости привлечения довольно экстравагантных гипотез, но и в найденном механизме первоначального захвата Венеры в резонанс. Последнее невозможно объяснить за счет приливных явлений в существующих условиях, в отличие от ситуации с Луной и Меркурием.

Модель кольцевого сжатия приводит также к достаточно обоснованному предположению об образовании в ходе эволюции протопланетного газовопылевого диска в отдельных аккумуляционных зонах занептуновой области нескольких астероидных поясов, схематически показанных на рис. 9. Вследствие гравитационного взаимодействия внутри поясов, особенно астероидов пояса *А*, часть которых попадала в сферу действия Нептуна, могла происходить быстрая и сильная трансформация их орбит и миграция в области, лежащие внутри орбиты Нептуна, с последующим опусканием перигелиев этих тел вплоть до районов планет земной группы. Такой механизм, который вероятно действовал наиболее эффективно в течение первого миллиарда лет существования Солнечной системы, позволяет достаточно просто объяснить своеобразность орбиты Плутона вместе с его спутником, орбит астероидов групп Аполлона и Троянцев, а также выпадение крупных метеоритов на поверхности планет земной группы на завершающей стадии их формирования.

...Небосвод завалился ольхою.
Этим звездам к лицу б хохотать,
Ан вселенная — место глухое.

Б. Пастернак, 1917

Она себе платье скроила из камня.

Поль Элюар,
«Естественный ход вещей».

Глава III. ПОВЕРХНОСТИ ПЛАНЕТ

Лицо планеты — ее поверхность. Структурные формы поверхности, особенности рельефа, физико-химические свойства отдельных характерных областей (провинций, как говорят геологи) содержат важнейшие сведения о настоящем и прошлом планеты, закономерностях и хронологии событий, формировавших ее современный облик. Очень часто процессы, происходившие в отдаленные геологические эпохи, проявляются в тех или иных чертах рельефа даже тогда, когда сами первичные структуры оказываются сильно камуфлированными последующими процессами или подверглись разрушению и сносу (денудации). Многое зависит здесь от относительной роли и специфических особенностей проявления внутренних (эндогенных) и внешних (экзогенных) факторов в формировании поверхностных структур и последовательности напластования осадочных толщ. Поэтому, помимо рельефа, важнейшее значение для расшифровки и прочтения «каменных летописей», каковыми по существу являются поверхности планет, имеет изучение и сопоставление слагающих горных пород, их элементного и минералогического состава. Определенную информацию об этих свойствах несут характеристики отражения солнечного света планетной поверхностью, которые сопоставляются со спектрами отражения земных минералов. Метод этот, впервые примененный в 60-х годах к Луне, получил в дальнейшем большое развитие при исследовании Меркурия и особенно астероидов, что позволило провести их классификацию по этим признакам.

К настоящему времени выделено около 50 групп астероидов с примерно одинаковыми отражательными свойствами в пределах каждой группы.

В отличие от планет земной группы и спутников планет-гигантов, сами планеты-гиганты являются массивными газово-жидкими телами и твердой поверхности не имеют. При наблюдениях с Земли на диске Юпитера четко выделяется система полос, исторически получивших название зон и поясов. Подобная полосчатая структура, хотя значительно менее четко выраженная, выявляется и на диске Сатурна. В то же время Уран и Нептун не обнаруживают каких-либо деталей на фотоснимках этих планет, полученных с высотных баллонов даже при разрешении вплоть до четверти угловой секунды, что составляет приблизительно 16-ю часть углового диаметра Урана и 8-ю часть—Нептуна.

Последовательность процессов формирования поверхностей планет земной группы восходит к завершающей фазе аккреции, когда были близки к исчерпанию потоки астероидных тел, выпадавших на поверхность. К этому периоду обычно относят крупные, частично модифицированные кратеры на лунных материках, схожей морфологии кратеры на Меркурии и наиболее древние, сильно эродировавшие кратеры на Марсе. Следы этой стадии, вероятно, сохранились и на Венере; на Земле же вследствие существования гидросферы и биосферы не только самые древние, но и более поздние структуры стерты интенсивной эрозией или похоронены под мощным осадочным чехлом. Вместе с тем фотографии поверхности Земли из космоса позволяют различать целый ряд подлежащих кольцевых структур, очевидно являющихся следами ударной бомбардировки. Наиболее крупные из них получили название астронов.

К сожалению, из всех планет только Земля доступна пока изучению всем разнообразным арсеналом средств, которым располагают сейчас современная геология, геофизика, геохимия. Между тем еще всего лишь 15—20 лет назад мы не знали, как выглядит приблизительно $^2/_3$ поверхности нашей собственной планеты, скрытой под водной толщей океанов и морей. «Увидеть» дно океанов позволили гидроакустические методы. Многочисленные корабли, оснащенные специальными приборами — эхолотами, измеряющими глубину по времени распространения отраженного от дна звукового сигнала, подробно

исследовали подводный рельеф, выявив ряд феноменальных структур, не имеющих аналогов на земных континентах. Разнообразие этих структур показано на физиографической карте (рис. 10). К ним прежде всего относятся система срединно-океанических хребтов, пояса активных островных дуг, многочисленные отдельные подводные горы и вулканы.

Система срединно-океанических хребтов, обладающих интенсивно расчлененным рельефом, носит глобальный характер. Эта система представляет собой четко выраженный мобильный пояс, протянувшийся по ложу всех океанов на длину около 64 тыс. км и частично распространяющийся на материки. Наиболее типичны срединные хребты Индийского и Атлантического океанов, отдельные поднятия которых возвышаются над океаническим дном на 3,5—4 км. К срединно-океаническим хребтам приурочены крупные тектонически активные разрывные структуры — рифтовые зоны, представляющие собой системы узких замкнутых ущелий с крутыми стенками — грабенов шириной от единиц до десятков километров, длиной в десятки — сотни километров и глубиной 1—4 км. Они обрамлены горными грядами (горстами), разделенными межгорными впадинами-грабенами, с относительными перепадами рельефа в 2—3 км. Для срединных хребтов, особенно районов рифтовых зон, характерна высокая степень сейсмичности и проявления современного вулканизма. В неменьшей степени эти процессы свойственны островным дугам и сопряженным с ними глубоководным желобам. Это области современных горообразовательных процессов на Земле. Здесь наиболее часто происходят землетрясения, извержения вулканов, что способствует оползням и аккумуляции вещества, за счет чего частично выглаживается дно желобов. Системы вулканических островных дуг окаймляют запад Тихого, северо-восток Индийского, запад и юг Атлантического океанов. Большую площадь океанического дна занимают также протяженные холмистые и плоские равнины, разделенные отдельными сводово-глыбовыми поднятиями и вулканическими хребтами. Вершины некоторых из этих вулканов выступают над водной поверхностью, образуя острова.

Для изучения рельефа и физико-химических свойств поверхностного вещества земных континентов и дна океанов существуют практически неограниченные возмож-

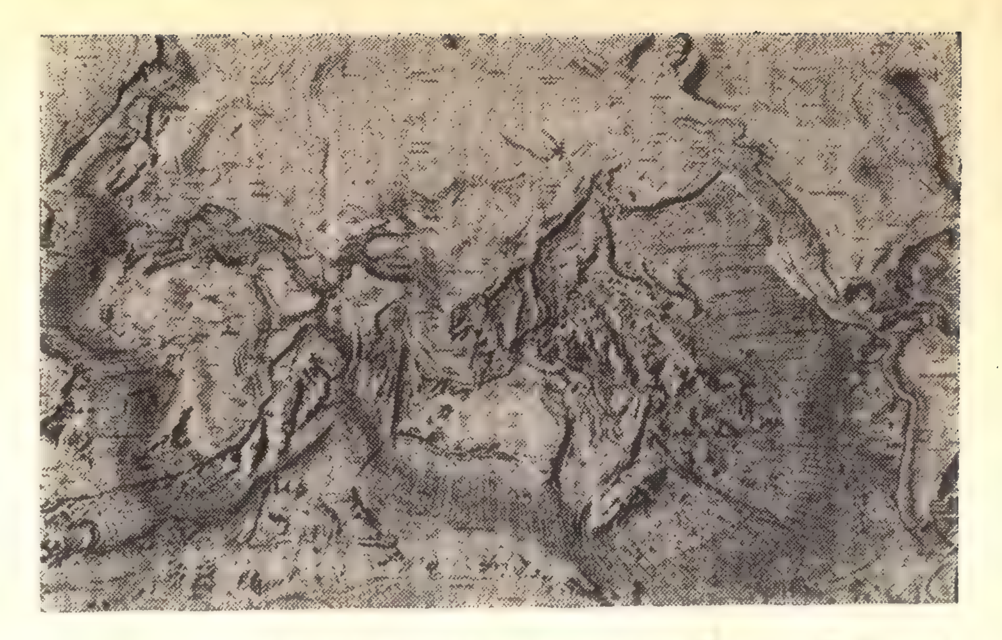


Рис. 10. Рельеф поверхности материков и океанического ложа Земли (по Б. Хизену и М. Тарп).

ности, и они повсеместно и широко используются. Правда, исследования ограничиваются осадочными и сильно измененными (как говорят, метаморфическими) породами земной коры. Кора Земли по разным оценкам, полученным методами сейсмического зондирования, имеет мощность от 30—60 км под континентами до 5—10 км под океаническим ложем. Мощность осадочно-вулканогенного покрова увеличивается по мере удаления от осей срединно-океанических хребтов к их подножиям, и в тех же направлениях увеличивается возраст пород, залегающих на претерпевшем наименьшие изменения «базальтовом слое» коры. К этим выводам привели результаты бурения сверхглубоких скважин в океанах со специально оборудованного судна «Гломар Челленджер», что оказалось весьма эффективным, поскольку, как мы уже сказали, океаническая кора значительно тоньше.

Иная ситуация на тех небесных телах, у которых поверхностное вещество не претерпело столь же существенных, как на Земле, изменений, поскольку там не было эффективных источников накопления осадочных пород, обусловленных наличием гидросферы и атмосферы. К ним в первую очередь относятся Луна и Меркурий. С расположенной сравнительно близко от Земли Луной астрономам совершенно естественно и больше всего «повезло» — была достаточно подробно исследована морфология ее поверхности, рельеф и многие другие свойства видимого с Земли полушария. Луна стала и первым объектом, на примере которого была убедительно показана высочайшая эффективность новейшего инструмента планетных исследований — космических аппаратов. Всего за 10 лет пройден громадный путь от получения фотографий обратной стороны Луны до высадки первой лунной экспедиции. Ныне подробно изучены многие районы поверхности (рис. 11), на которой оставлены следы ног космонавтов и колес луноходов, проведены многолетние исследования разнообразных геологических структур, сейсмичности лунных недр, теплового потока из глубины, интенсивности эрозии поверхности и др.

Но, конечно, наиболее важными с точки зрения датирования и расшифровки геологических процессов, происходивших на Земле в докембрийский период (свыше 570 млн. лет назад), оказались результаты анализа лунного грунта, отобранного автоматическими станциями «Луна» и экспедициями кораблей «Аполлон» из не-

Рис. 11. Рельеф поверхности Луны.

скольких «морских» и «материковых» районов нашего естественного спутника. Вместе с тем накопленных знаний пока еще недостаточно для того, чтобы можно было безошибочно «прочитать» древнюю историю Луны (и по аналогии с ней Земли); скорее следует говорить о том, что полученные результаты весьма обнадеживающие и что следует продолжать интенсивную работу в этом направлении.

ОПТИЧЕСКИЕ И РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ. СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ

При наблюдении с Земли в телескоп на поверхности Луны различаются детали протяженностью немногим более 1 км. Такого разрешения достаточно, чтобы подробно изучать морфологию сравнительно крупномасштабных образований. Однако на основе таких наблюдений невозможно сказать, например, что представляет собой поверхность по своим механическим свойствам. Здесь среди астрономов не было единого мнения, достаточно вспомнить о том, что высказывались предположения о толстом слоем пыли, в котором может буквально «утонуть» космический аппарат, опустившийся на лунную поверхность. Как мы теперь хорошо знаем, эти опасения не оправдались (впервые это показала в 1966 г. автоматическая станция «Луна-9»), хотя самый верхний слой Луны действительно оказался довольно рыхлым, состоящим из мелких, сравнительно слабо связанных частиц. Его называют реголитом.

Что касается планет и их спутников, то исследования рельефа их поверхностей лежат за пределами возможностей оптической астрономии. К тому же из всех планет только Марс более или менее удобен для наземных наблюдений. Наилучшее достигнутое разрешение (около 500 км) позволяет выделить на его поверхности только отдельные светлые и темные области с изменчивыми очертаниями, исторически получившие, подобно Луне, название «материков» и «морей», и белые полярные шапки вблизи полюсов. Из-за чрезвычайно плотной атмосферы и протяженных облаков поверхность Венеры в оптическом диапазоне вообще не видна, а угловое разрешение при наблюдениях Меркурия примерно в 300 раз хуже, чем при наблюдениях Луны. Поэтому даже в лучшие

телескопы на его ярко освещенном Солнцем диске можно различить лишь несколько более темных деталей. Видимый контраст их меньше по сравнению с материками и морями на Луне.

Вместе с тем в характере отражения Меркурием солнечных лучей, и особенно в их поляризации, а также тепловой эмиссии этой планеты в инфракрасном диапазоне спектра есть много общего с Луной. Это привело к представлениям о том, что подобно поверхности Луны, поверхность Меркурия покрыта слоем раздробленных пород, аналогичных лунному реголиту. Была также измерена температура дневного и ночного полушарий планеты. Естественно, что на близком расстоянии от Солнца и в отсутствии атмосферы контраст температур оказался значительно больше, чем на Луне. В районе экватора температура поверхности опускается ночью до минус 165°С, а днем, когда планета находится в перигелии, поверхность нагревается до +480°С.

Известно, что по своей структуре и химическому составу лунные моря и материки близки к континентам и океаническим впадинам на Земле. Если в состав морей преимущественно входят породообразующие минералы типа пироксенов (обогащенные железом и магнием), то материки образованы более легкими полевошпатовыми породами (в которых преобладают алюминий и щелочные металлы). Казалось бы, до определенной степени эту аналогию можно распространить и на Меркурий, поскольку он отражает электромагнитное излучение почти так же, как Луна. Это подтверждается и характеристиками его собственного теплового излучения, схожими значениями параметров тепловой инерции. У Меркурия, однако, несколько ниже, чем у Луны, отражательная способность (альбедо) в видимой области спектра. Для объяснения этой особенности ранее высказывались предположения о повышенном содержании в минералах поверхностного слоя железа и титана, что действительно можно было бы согласовать с наличием пироксена. Позднее было найдено, однако, что в спектре отражения Меркурия преобладают синие, а не красные лучи, как на Луне, что привело, наоборот, к выводу об обеднении поверхностного слоя этими металлами. Оценки дают содержание в нем окиси железа в пределах всего 3—6%, что подкрепляет представления о происшедшей дифференциации вещества недр планеты.

Различия отражательных свойств поверхности «морей» и «материков» на Марсе обусловлены свойствами материала, преимущественно довольно рыхлого, раздробленного, но с разными преобладающими фракциями частиц. Сопоставление данных о спектральной зависимости альбедо марсианской поверхности с лабораторными спектрами отражения земных грунтов в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн показало, что для темных областей это, скорее всего, раздробленные базальты с размерами зерен более 0,5 мм, а в светлых областях размеры зерен менее 0,05 мм. Действительно, по своему минералогическому составу грунт в местах посадки аппаратов «Викинг» в целом оказался соответствующим изверженной базальтоидной породе, однако с относительно бо́льшим содержанием железа и меньшим кремния. Это свидетельствует о том, что дифференциация вещества марсианских недр была менее полной, чем на Земле, но вместе с тем служит независимым дополнительным подтверждением геологической активности планеты в процессе ее эволюции. Среднее значение плотности верхнего слоя грунта, определенное путем измерений со спутников при помощи инфракрасных радиометров (1,5—2 г/см^3), было подтверждено результатами анализа углубления опор посадочных аппаратов и операций с грунтозаборным устройством (1,2—1,8 г/см^3). Полученные значения существенно больше, чем на Луне, но заметно меньше, чем на Венере.

Богатые железом глины и гидратированные окислы металлов в поверхностном слое Марса, возможно оказавшие определенное влияние на водный обмен между поверхностью и атмосферой, придают ему характерный оттенок красноватой ржавчины, подобной окраске земных пустынь. Не случайно одна из крупнейших пустынь Туркмении так и называется — Кызыл-Кум, что означает Красные пески. То, что ржавый цвет Марса обусловлен водными окислами железа, предполагали многие исследователи, изучавшие его отражательные и цветовые характеристики. На самом деле измерения элементного состава на «Викингах» привели к выводу, что грунт на 80% вероятно состоит из глинистых минералов (монтмориллонита и нонтронита), а окислы железа составляют около 5% (остальное — сульфат магния и карбонаты). Такой грунт мог образоваться вследствие выветривания ультраосновных и магматических основных

горных пород (дунитов, базальтов) в условиях сухой, практически лишенной кислорода атмосферы планеты.

Жителям Земли совершенно непривычно было бы, попав на Марс, столкнуться с тем обстоятельством, что температура его поверхности испытывает значительно более сильные сезонно-суточные вариации, достигающие почти 100°. Однако амплитуда суточных вариаций быстро уменьшается с глубиной — примерно втрое на каждые 5 см, так что на глубине в несколько десятков сантиметров колебания температуры практически отсутствуют. Это позволяет говорить о чрезвычайно низкой теплопроводности марсианского грунта (вносящей определяющий вклад в так называемый параметр тепловой инерции, получаемый непосредственно из измерений излучения поверхности в инфракрасном и радиодиапазонах), что имеет важные следствия для планетной метеорологии. К этой проблеме мы вернемся немного позднее.

Как мы уже упоминали, с начала 60-х годов для исследования периодов и направления вращения планет, а вслед за тем рельефа и физических свойств их поверхностей стала успешно применяться радиолокация. За короткий период ее возможности значительно возросли вследствие совершенствования как аппаратуры, так и методов измерений. Для определения периодов вращения используются результаты анализа величин смещения и расширения спектральной линии отраженного излучения (эхо-сигнала), обусловленных эффектом Доплера, а для изучения профилей и свойств поверхности — данные об интенсивности отраженного излучения и о распределении интенсивности по спектру, с учетом времени запаздывания прихода сигналов на приемную антенну и доплеровского сдвига по частоте. Важную информацию о микроструктуре поверхности несут также данные измерений степени поляризации отраженных планетой радиоволн.

К сожалению, радиолокационные исследования наиболее информативны для низкоширотных областей, поскольку при переходе к высоким широтам, а значит, удалении от самой близкой к Земле (подрадарной) области, дающей наибольший вклад в отражение, погрешности измерений и неоднозначность их интерпретации резко возрастают. Рабочий диапазон частот для наземных радиолокационных станций, определяемый с учетом

минимального поглощения в земной атмосфере, охватывает широкую полосу длин волн от миллиметров до метров. В радиолокационной астрономии преимущественно используются сантиметровые волны.

Радиолокационные исследования поверхности Марса особенно интенсивно проводились в конце 60-х и начале 70-х годов, до тех пор пока этот метод практически не был вытеснен мощным потоком информации с искусственных спутников планеты. Наилучшее достигнутое в этот период разрешение составило 8 км по долготе и около 80 км по широте в пределах широтного пояса $\pm 20^\circ$ по обе стороны от экватора. Были обнаружены значительные вариации марсианского рельефа, достигающие высоты 14 км в глобальном масштабе. На отдельных участках длиной в десятки и сотни километров были выявлены многочисленные перепады высот в 1—2 и более километров, большинство из которых, как подтвердили в дальнейшем результаты фотографирования Марса с космических аппаратов, правильно ассоциировались с кратерами поперечником до 50—100 км. Одновременно оценивались рассеивающие свойства поверхности и углы наклона участков, сопоставимых по своей протяженности с длиной волны. Чем больше эти углы, тем больше шероховатость поверхности, или другими словами, более неоднороден микрорельеф. Оказалось, что участки марсианской поверхности, от которых отражаются радиоволны, в целом довольно сглаженные: углы их наклона лежат в пределах от 0,5 до 5°, что существенно меньше, чем у Луны или Меркурия.

Интенсивность отраженного планетой сигнала зависит от коэффициента отражения, с которым непосредственно связаны физические свойства поверхности (прежде всего плотность поверхностного слоя на глубине порядка нескольких длин волн зондирующего излучения) и характер слагающих поверхностных пород. Этими свойствами определяется величина диэлектрической проницаемости ε материала, от которого отражается электромагнитная волна. Для различных сухих земных пород экспериментальным путем была найдена простая эмпирическая зависимость между диэлектрической проницаемостью и плотностью. Таким образом, измеряя ε, можно оценивать плотность грунта на планете. Впервые этот метод был успешно применен при исследованиях Луны. Радиолокационные исследования Марса обнаружили ко-

лебания диэлектрической проницаемости его поверхности в широких пределах, примерно от 2 до 7, чему отвечают значения плотности от 0,6 до 3,3 г/см^3. Эти оценки были позднее подтверждены путем измерений при помощи бортовых радиометров сантиметрового диапазона, работавших на спутниках Марса «Марс-3» и «Марс-5». Полученный широкий диапазон значений свидетельствует об изменении свойств марсианской поверхности от твердых скальных пород до сильно раздробленных, сыпучих грунтов, что, как мы увидим в дальнейшем, действительно имеет место в различных районах этой планеты.

Мощность сигналов, отраженных от Меркурия, приблизительно на один-полпорядка величины меньше, чем соответственно от Марса и Венеры. Поэтому для радиолокационных исследований Меркурий является особенно трудной планетой. Исследования функции рассеяния и поляризации радиоизлучения в сантиметровом диапазоне длин волн привели к выводу о наличии на его поверхности многочисленных мелких неровностей. Средняя величина уклонов на нескольких участках экваториальной области оценивается равной примерно 10° — вдвое больше, чем на Марсе. Были обнаружены неоднородности рельефа, достигающие на участках длиной в сотни километров 1—3 км по высоте. По величине коэффициента отражения Меркурия в радиодиапазоне, который оказался почти таким же, как у Луны, было получено среднее значение диэлектрической проницаемости $\varepsilon=2,5$, чему соответствует плотность поверхностного слоя около 1,2 г·см$^{-3}$. Это значение является промежуточным между плотностями поверхностных пород Луны и Земли и, как видим, много меньше средней плотности Меркурия, что имеет важные следствия при решении проблемы его внутреннего строения.

Для Венеры, окруженной плотной газовой оболочкой, радиометоды — наиболее эффективное средство исследований этой планеты, причем ширина «окна прозрачности» для зондирующего излучения минимальна. Радиоволны в диапазоне приблизительно от 3 до 30 см — это по существу единственное электромагнитное излучение, почти беспрепятственно проходящее сквозь ее атмосферу. В таких лучах можно не только исследовать поверхность, но и «увидеть», как она выглядит. Для этого необходима высокая пространственная избирательность приемной антенны на Земле. Обычно это достигается пу-

тем приема отраженного сигнала на две разнесенные на некоторое расстояние антенны, работающие по принципу радиоинтерферометра. По разности фаз принятого сигнала последовательно измеряется положение каждого участка поверхности относительно некоторой среднеуровенной фигуры планеты. Очевидно, что чем выше пространственная избирательность антенны, тем выше разрешение на поверхности исследуемого небесного тела и соответственно тем качественнее изображение. Этим методом, называемым частотно-временным методом селекции, были, например, получены изображения Луны, которые трудно отличить от обычных фотографий, получаемых при помощи наземных оптических телескопов.

По данным многочисленных радиолокационных зондирований приэкваториального пояса Венеры не было выявлено столь же значительных, как на Марсе, вариаций рельефа. Типичные перепады высот оказались в пределах 2—4 км на участках длиной до 400 км. Вместе с тем по данным об отражении радиоволн сложились представления о существенной неоднородности физических свойств ее поверхности. Наиболее полные данные об отражательных свойствах были получены на американских станциях Голдстоун в Калифорнии и Аресибо в Пуэрто-Рико. В Голдстоуне прием отраженного излучения производился на две антенны диаметром 64 м и 26 м, разнесенные на 21,6 км, а в Аресибо использовалась самая большая 300-метровая антенна, смонтированная в кратере потухшего вулкана. Это позволило получить карту отражательных характеристик поверхности в полосе широт $\pm 70°$ и «изображения» нескольких отдельных участков поперечником 1500 км вблизи экватора.

Карта приэкваториального пояса, полученная по измерениям в Голдстоуне, показана на рис. 12, а фрагмент карты для высоких широт северного полушария Венеры по данным измерений в Аресибо — на рис. 13. За нулевой меридиан здесь выбрано направление на Землю в нижнем соединении. Отношение интенсивностей отражения светлых и темных областей достигает 20 : 1. Наиболее обширные светлые области примерно на 30° южной и северной широты (долготы 0° и 280°) поперечником свыше 1000 км, обнаруженные еще в самом начале радиолокационных исследований Венеры, получили обозначения α, β и δ. Еще одна светлая область вблизи нулевого меридиана на широте 65° *N* названа Максвелл.

3*

Из рис. 12 видно, что примерно аналогичная светлая область расположена несколько выше по широте в районе долгот 310—340°.

Чем могут обусловливаться столь значительные различия в отражательных свойствах венерианской поверх-

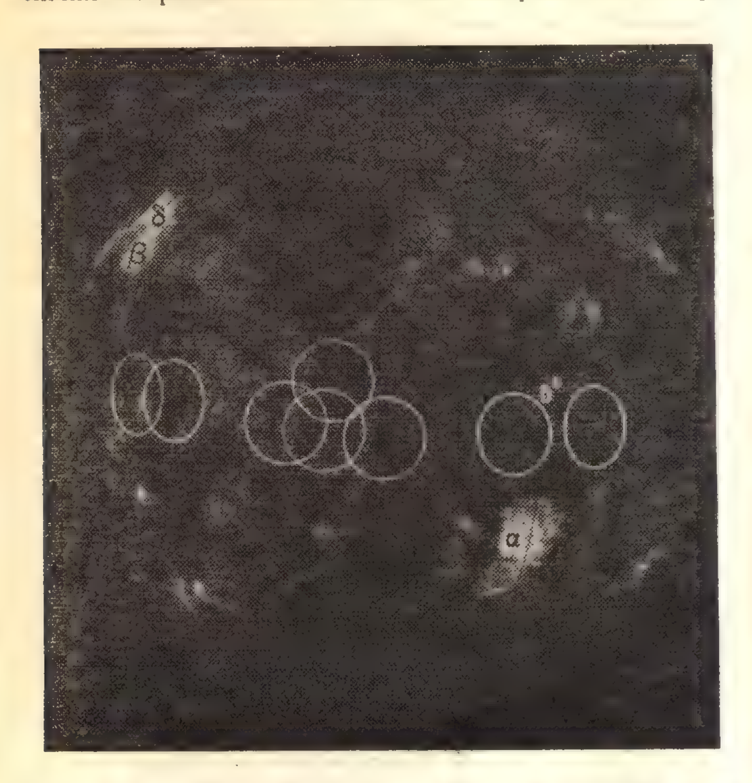


Рис. 12. Радиоизображение Венеры в радиолинии 12,5 см, показывающее распределение отражательных свойств на ее поверхности в экваториальных и средних широтах (по Р. Голдстейну и др.); окольцованы области, для которых получены крупномасштабные радиоизображения.

ности? Таких основных причин называлось три. Во-первых, микроструктура поверхности: чем она шероховатее, тем больше отражение, которое минимально в случае зеркально-гладкой поверхности. Во-вторых, физико-химические свойства поверхности, от которых зависит величина диэлектрической проницаемости материала ε:

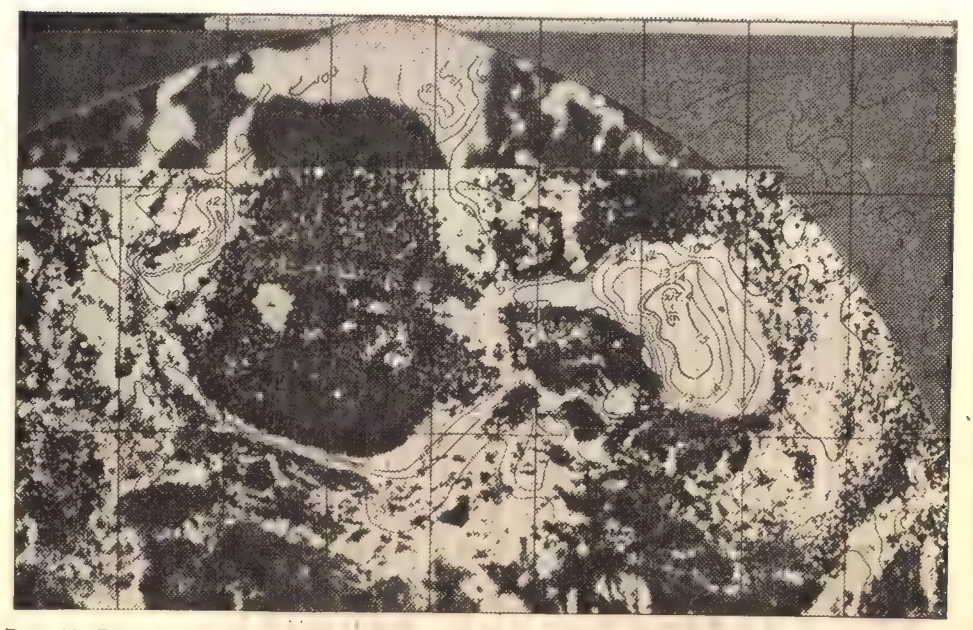


Рис. 13. Радиоизображение высокоширотной области Венеры, полученное на обсерватории Аресибо, с наложенными горизонталями по данным радиоальтиметра со спутника «Пионер — Венера» (по Г. Петтенгилу и др.). Горизонтали показывают значения высот от условного уровня, который на 6 км меньше среднего радиуса Венеры (6051 км).

с повышением ε степень отражения возрастает. Наконец, рельеф: чем выше область, тем меньше над ней толщина атмосферы, а значит, меньше и степень поглощения радиоволн. Рассмотрим все эти возможности подробнее, опираясь на полученные экспериментальные результаты.

Было найдено, что поляризация основной доли энергии отраженных Венерой радиоволн соответствует зеркальному отражению и что отношение деполяризованного отражения к поляризованному у Венеры существенно меньше, чем у Луны. Это означает, что по сравнению с Луной микроструктура ее поверхности в среднем более гладкая, причем бо́льшие неровности связаны с областями повышенного отражения радиоволн. Об этом же свидетельствуют и оцененные средние наклоны поверхностных неровностей, которые оказались заключенными в пределах 1—5°, т. е. примерно такими же, как у Марса.

Диэлектрическая проницаемость венерианской поверхности изменяется в сравнительно небольших пределах, примерно от 4 до 5,5; для среднего значения $\varepsilon=4{,}7$ получается оценка плотности 2,3 г/см^3, что существенно больше, чем для Луны и отдельных районов Марса, и очевидно, свидетельствует об отсутствии пористых или мелкораздробленных пород в поверхностном слое Венеры. Величине $\varepsilon=4{,}7\pm0{,}8$ соответствуют сухие силикатные породы типа базальта и гранита, плотность которых заключена в пределах 2—3 г/см^3. Действительно, непосредственные измерения характера слагающих поверхностных пород на спускаемых аппаратах автоматических станций «Венера-8,9 и 10» полностью подтвердили такие представления.

Эксперименты проводились при помощи гамма-спектрометров, измерявших на поверхности естественную радиоактивность породы в месте посадки станции путем регистрации интенсивности жесткого гамма-излучения в нескольких характерных линиях урана, тория и калия. Излучение создается радиоактивным распадом этих элементов, всегда присутствующих в коре планеты. Соотношение их интенсивностей служит хорошим указателем того, какой преобладающий тип породы слагает поверхностный слой исследуемого участка. Этот метод, предложенный академиком А. П. Виноградовым, впервые был успешно применен на искусственном спутнике Луны «Луна-10», что позволило сделать вывод о базальтоидном характере лунных пород. Однако использование спут-

ника в данном случае было возможно потому, что у Луны практически нет атмосферы и гамма-излучение беспрепятственно достигает его орбиты. Для Венеры же единственная возможность проведения таких измерений — посадка на поверхность, что и было реализовано в 1972 и 1975 гг. Оказалось, что тип породы в месте посадки «Венеры-8» близок к земным гранитам, а в местах посадки «Венеры-9 и 10» преобладают базальты. «Венера-10» одновременно измеряла и плотность грунта при помощи радиоактивного плотномера. Эксперимент дал значение 2,7±0,1 г/см^3, как видим, отлично согласующееся с оценкой, полученной из радиолокационных измерений ε.

Наконец, даже относительно небольшие вариации рельефа могут вносить заметный вклад в распределение отражательных свойств по поверхности просто в силу того, что у поверхности наиболее плотная атмосфера. Перепады высот в пределах 2—4 км изменяют толщину поглощающего слоя атмосферы приблизительно на 15—25%, а при наличии возвышений до 10 км эффективная толщина уменьшается почти вдвое. Таким образом, каждый из рассмотренных возможных источников может вполне определенно влиять на повышенное отражение отдельных областей. Поэтому, чтобы понять, чем реально обусловлена довольно большая пестрота отражательных свойств на картах рис. 12 и 13, необходимы дополнительные экспериментальные данные. Среди них первостепенное значение имеют «радиоизображения» и высотные профили (альтиметрирование) поверхности.

РЕЛЬЕФ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ

Области, для которых были получены наиболее детальные «изображения» поверхности Венеры с Земли, показаны на рис. 12 кружками. В пределах этих областей разрешение по поверхности достигает 15 км, а по высоте 200 метров. Пример полученных изображений приведен на рис. 14. Они позволили выявить ряд крупномасштабных форм рельефа, среди которых прежде всего выделяется много кратеров диаметром от 30 до 150 км. Кратеры необычайно мелкие, глубина самых крупных не превышает 0,3—0,5 км, что примерно в 10 раз меньше, чем для кратеров аналогичного размера на Луне или Меркурии и по крайней мере в 5 раз меньше, чем для кратеров Марса. Это независимо свидетельствует

о сглаженности венерианской топографии в экваториальных районах планеты.

Еще более детальные структуры недавно обнаружены благодаря установке радиотелескопов на искусственных спутниках Венеры. Перспективы в этом направлении исключительно велики, и уже в ближайшие годы можно

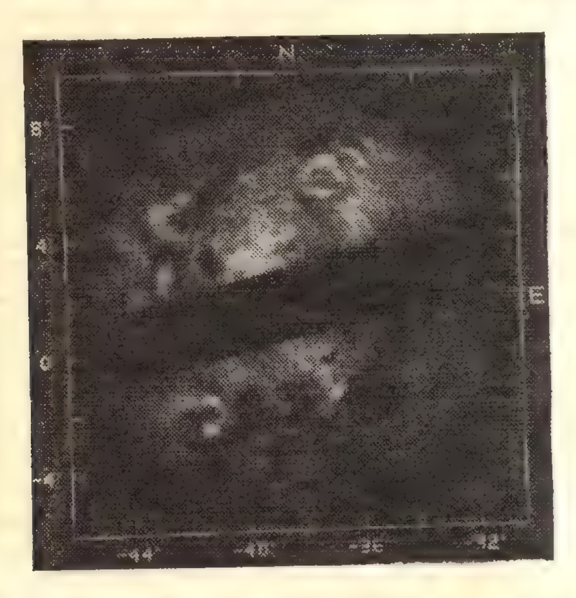


Рис. 14. Крупномасштабное радиоизображение поверхности Венеры, показывающее наличие кратеров. Поперечник снимка — около 1500 км. *N* — север, *E* — восток. Черная полоса — область, в которой детали поверхности при радиоинтерферометрическом методе не выделяются.

ожидать получения радиоизображений поверхности Венеры, не уступающих по качеству переданным с космических аппаратов фотоснимкам Марса, Меркурия, Юпитера и его спутников. Важность получения фототелевизионных и радиоизображений, открывших принципиально новый этап в изучении морфологии и физических свойств поверхностей, геологической истории и эволюции планет, буквально трудно переоценить. Возможности исследований неизмеримо расширились не только благодаря высокому разрешению, в сотни раз превосходящему лучшее достигнутое разрешение при фотографиро-

вании с Земли, но и благодаря глобальному охвату всей планеты, доступности неблагоприятных по тем или иным причинам для наземных наблюдений областей и полярных районов. Так, например, для Венеры при оптических наблюдениях или при радиолокации с Земли наиболее удобны, как мы отмечали, периоды вблизи нижнего соединения, когда Венера обращена к нам одной и той же стороной. Поэтому другое ее полушарие и полярные районы практически не исследованы. Применение спутников легко решает эту задачу.

Первые эксперименты по радиокартированию были проведены в 1975 г. с искусственных спутников «Венера-9 и 10», для чего использовался так называемый метод бистатической радиолокации. Идея этого метода состоит в том, что поверхность планеты облучается радиоволнами с орбиты спутника, а отраженные радиосигналы принимаются на Земле. А дальше, как и при радиолокации с Земли, по разности времен прихода и ширине спектров этих сигналов оцениваются перепады высот и степень шероховатости поверхности, и уже знакомым нам частотно-временным методом селекции (т. е. из анализа зависимости интенсивности отраженного сигнала от частоты и времени) строится радиоизображение исследуемого района. Было обнаружено несколько крупномасштабных склонов в южном полушарии Венеры, вытянутых в широтном направлении на несколько сот километров. Высота этих склонов оказалась более 3 км, а поверхность их слабошероховатой, почти гладкой, как и на других исследованных равнинных участках.

Другой метод радиокартирования использован на спутнике «Пионер — Венера». Радиолокация производится здесь самим спутником, без участия наземных радиотелескопов: спутник излучает радиоволны и принимает обратно отраженные сигналы, и уже результаты радиолокации передаются на Землю. Радиоволны со спутника излучаются как вдоль вертикали, так и под некоторым углом по отношению к исследуемому участку поверхности. Зондирование по вертикали позволяет по времени задержки и интенсивности отраженных сигналов измерять высоту рельефа и физические свойства поверхности вдоль трассы полета спутника (как говорят, проводить альтиметрирование). В свою очередь наклонное зондирование («боковой обзор») позволяет получать радиоизображения. Оно осуществляется за счет програм-

много вращения спутника с установленной на нем антенной таким образом, что радиолуч «скользит» по поверхности по обе стороны от плоскости орбиты спутника, проходя через вертикаль. Измерения времени задержки и доплеровского смещения частоты отраженных сигналов обеспечивают в этом случае необходимую для получения изображения пространственную избирательность даже при использовании сравнительно небольшой антенны спутника. Пока что разрешение, достигнутое на спутнике «Пионер — Венера» (30—50 км), заметно уступает разрешению, полученному на радиоизображениях с Земли (10—15 км). Однако результаты радиоальтиметрирования в сочетании как с наземными, так и со спутниковыми радиоизображениями, существенно прояснили природу отражательных свойств и особенности рельефа многих районов поверхности планеты.

На рис. 15 показана карта рельефа поверхности Венеры со средним разрешением около 100 км. Светлые участки — равнинные, темные — возвышенные. Оказалось, что около 60% поверхности Венеры лежит в пределах ±0,5 км от среднего уровня, соответствующего радиусу 6051,1 км, в то время как гористые районы занимают по площади менее 2% поверхности. Таким образом, в целом Венера оказалась наиболее сферической из всех планет, с очень выглаженным рельефом. Но есть и очень крупные горные массивы. На фрагменте поверхности, показанном на рис. 13, нанесены горизонтали — линии одинаковой высоты над некоторым условным уровнем поверхности, принимаемым при радиолокационных измерениях (который на 6 км ниже среднего). Как видим, практически вся область представляет собой громадное поднятие. Особенно выделяются (рис. 15) уже упоминавшийся район Максвелл, а также два светлых района к западу и к северу от обширного темного плато грушевидной формы протяженностью свыше 2000 км (приблизительно вдвое превышающее, например, размер Тибета). Высота этого плато, названного Иштар (женское божество в ассиро-вавилонской мифологии, олицетворяющее планету Венера) не менее 4—5 км, а окаймляющие его хребты еще на несколько километров выше. От соседних равнин оно отделено крутыми уступами (эскарпами). Вулканический конус в центре Максвелл достигает высоты 12 км над средним уровнем поверхности, почти в полтора раза превосходя высочайшую вершину Земли Джомолунгму.

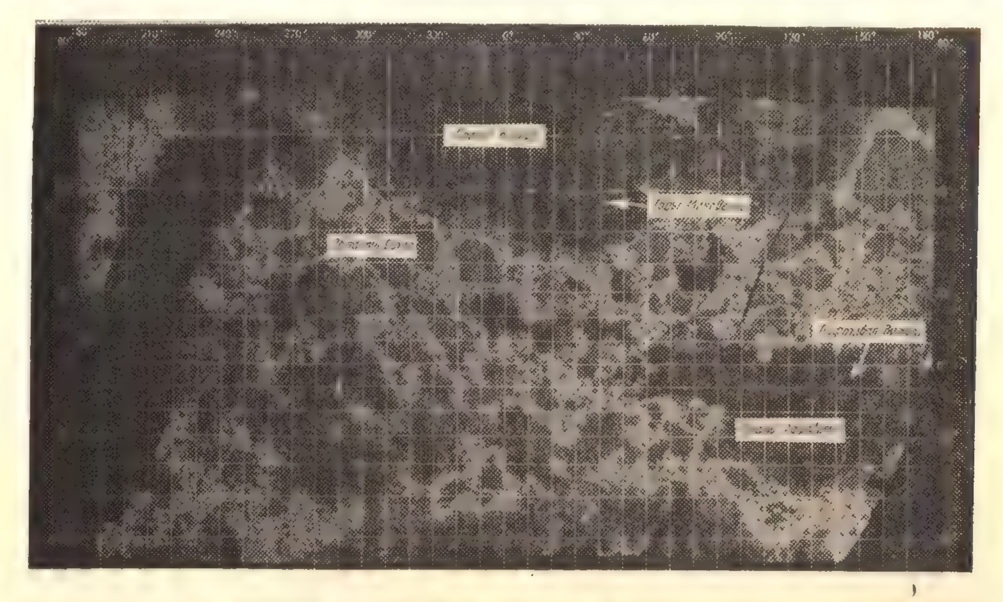


Рис. 15. Карта поверхности Венеры, построенная по результатам радиоальтиметрирования с орбитального аппарата «Пионер — Венера». Светлые области — равнины, темные — плоскогорья, среди которых наиболее крупные названы Иштар и Афродита. Показаны также горы Максвелла и Рифтовая долина.

Его склоны имеют четко выраженную террасную структуру, а поперечник подошвы достигает почти 1000 км! Диаметр кратера на вершине 100 км, а глубина этого кратера 4 км. Весь район несомненно имеет тектоническое происхождение, и одновременно важную роль в формировании наблюдаемых структур играла также вулканическая деятельность. Возможно, центральная часть плато покрыта сравнительно молодыми лавовыми потоками.

Аналогичные соображения можно высказать и о светлой области α, также оказавшейся обширным плоскогорьем, названным Афродита — по имени богини любви и красоты в древнегреческой мифологии, отождествляемой с Венерой. В пределах этого плоскогорья обнаружены два обширных поднятия (см. рис. 12), названные Гаусс и Герц. Они несколько меньше, чем Максвелл, их размер в основании около 700 км, а высота над окружающей местностью 6—8 км. Эти горы тоже заманчиво связать с крупными щитовыми вулканами. Однако достигнутого разрешения пока недостаточно, чтобы, например, выявить наличие специфических вулканических кратеров на их вершинах — кальдер, подобных Максвеллу или хорошо известным также на Земле и Марсе. Помимо этих феноменальных образований, на обширных площадях, обладающих приблизительно однородной отражательной способностью, обнаружены сравнительно небольшие хребты, холмы, впадины и котловины, среди которых особенно выделяется протяженная глубокая долина в южном полушарии. По своим размерам она напоминает рифтовое ущелье внутри основного поднятия, подобное рифтовым зонам на океаническом ложе Земли, приуроченным к срединным хребтам. Ряд дополнительных данных о рельефе по-видимому указывает на то, что эта долина носит глобальный характер, т. е. как и на Земле, опоясывает всю планету. Все это служит убедительным свидетельством существования активной тектонической деятельности на Венере.

В пользу таких представлений говорят и чрезвычайно мелкие, сглаженные кратеры ударного происхождения. Мы упоминали о кратерах поперечником до 150—200 км и глубиной всего несколько сот метров на радиоизображениях нескольких районов вблизи экватора (см. рис. 14). Однако и обнаруженные в последнее время громадные кратеры до 500—700 км в поперечнике оказались схожей глубины (всего 500—700 м). Ма-

ловероятно, что определяющую роль в таком выравнивании сыграли интенсивные эрозионные процессы, хотя в условиях плотной горячей атмосферы они весьма эффективны. Скорее всего основное влияние здесь оказала высокая подвижность коры планеты.

Предположения о подвижности венерианской коры и венеротрясениях были высказаны еще в 1975 г., после получения первых фототелевизионных панорам поверхности, переданных с посадочных аппаратов «Венера-9» и «Венера-10». Они позволили впервые увидеть в непосредственной близости ландшафт соседней планеты (рис. 16). Оказалось, что в месте посадки «Венеры-10», расположенном к юго-востоку от области β и обладающей не очень сильным отражением радиоволн,— ровная каменистая пустыня, без сколько-нибудь заметных перепадов высот. Крупная каменная глыба, на которую опустился аппарат, поперечником не менее 3 метров, испещрена темными пятнами, вероятно представляющими собой небольшие углубления, заполненные грунтом. Сама эта глыба, как и другие ей подобные на большем удалении от аппарата, погружены в более темный грунт. Весь ландшафт, видимо, представляет собой выходы коренных магматических пород, претерпевших значительные изменения под воздействием высокой температуры и давления атмосферы. В центральной части глыбы видны явные следы раскола и ряд дополнительных трещин на краях. Их образование может быть связано как с внутренними процессами, происходящими на Венере, так и с ударом при посадке аппарата на поверхность,— истинную причину установить невозможно. Различия в микрорельефе поверхности (наличие ячеек, бугорков, небольших гребней и трещин на глыбах) и степени заполнения отдельных неровностей эродированным материалом отражают различия в составе пород, их неодинаковую устойчивость к факторам разрушения, среди которых основную роль, очевидно, играет химическое взаимодействие с атмосферными газами.

Место посадки «Венеры-9» отстоит от района, где опустилась «Венера-10», примерно на 2000 км и находится на северо-восточной оконечности области β. На панораме, переданной из этого района, внимание прежде всего привлекает обилие крупных остроугольных камней, которыми заполнена примерно половина площади поверхности. Размер наиболее крупных камней достигает 50—



Рис. 16. Панорамы поверхности Венеры, полученные в местах посадки станций «Венера-9» и «Венера-10». Районы съемки отстоят друг от друга на 2000 км. На переднем плане каждой панорамы — посадочное кольцо аппарата и видна штанга плотномера. Размеры самых крупных камней на панораме «Венеры-9» — 50—70 см.

70 см, а высота небольшая, всего 15—20 см. Для них характерна пластинообразная форма, наличие ступенчатых отколов. Они отчетливо видны, например, на трех плоских камнях слева от посадочного кольца аппарата, расположенного, как и на панораме «Венеры-10», в виде сегмента в нижней части снимка. Пространство между камнями заполнено сравнительно светлым материалом, очевидно, представляющим собой мелкозернистый грунт, образовавшийся в процессе разрушения и деформации поверхностной породы. Его можно уподобить лунному реголиту, как и покрывающий коренные скальные породы фрагментированный материал в месте посадки «Венеры-10». На отдельных камнях заметны темные пятна — возможно, следы эрозии, подобной той, о которой мы говорили, рассматривая панораму «Венеры-10».

Происхождение ландшафта на панораме «Венеры-9» скорее всего обусловлено разрушением горных пород скального типа под воздействием внутренних подвижек и разломов в коре планеты. В результате образовалась каменистая осыпь на склоне возвышенности, на который опустился аппарат. Крутизна этого склона около 30°, линия горизонта, в отличие от панорамы «Венеры-10», находится на расстоянии всего нескольких десятков метров. Камни, очевидно, довольно прочные, они не подверглись заметному разрушению. Можно предполагать, что сам этот ландшафт довольно типичен для Венеры и образовался сравнительно недавно (в геологическом масштабе времени). Возможно также, что происходит периодическое движение камней по склону вследствие предполагаемой высокой сейсмичности Венеры.

РЕЛЬЕФ ПОВЕРХНОСТИ МЕРКУРИЯ

Говоря о Венере или любой другой планете земного типа, планетологи обычно исходят из представлений о схожих путях их эволюции, по крайней мере на самых ранних этапах, скажем, для Земли — соответствующих раннему архею (свыше 3 млрд. лет назад). Однако следы этих этапов скрыты различными напластованиями более поздних формаций. Единственное исключение здесь, видимо, составляет Меркурий и в меньшей степени Луна, поскольку существуют обоснованные предположения, что она подверглась в процессе образования и эволюции мощному влиянию Земли. Наряду с астероидами, Мер-

курий можно рассматривать как наилучшим образом сохранившийся реликт стадии формирования больших планет. Своего рода «гипсовым слепком» этой стадии являются некоторые черты его поверхности, подобно тому как современная атмосфера Юпитера и кометы, очевидно, содержат информацию о веществе протопланетной туманности в период, предшествовавший началу аккумуляции планет.

С пролетной траектории космического аппарата «Маринер-10» в 1973 г. было сфотографировано свыше 40% поверхности Меркурия с разрешением от 4 км до 100 м (на отдельных участках), что позволило увидеть Меркурий примерно так же, как Луну в телескоп с Земли. Примеры полученных фототелевизионных изображений показаны на рис. 17, 18. Обилие кратеров — наиболее очевидная черта его поверхности, которую по первому впечатлению можно уподобить Луне. И не случайно даже специалисты-селенологи, которым показали эти снимки вскоре после их получения, приняли их за фотографии Луны.

Действительно, морфология кратеров близка к лунной, их ударное происхождение не вызывает сомнений: у большинства виден хорошо очерченный вал, следы выбросов раздробленного при ударе материала с образованием в ряде случаев характерных ярких лучей и поле вторичных кратеров. У многих кратеров различима центральная горка и террасная структура внутреннего склона. Причем такими особенностями обладают не только практически все крупные кратеры диаметром свыше 40—70 км (что наблюдается и на Луне), но и значительно большее число кратеров меньших размеров, в пределах 5—70 км (конечно, речь здесь идет о хорошо сохранившихся кратерах). Это можно отнести как за счет большей кинетической энергии тел, выпадавших на поверхность, так и за счет самого материала поверхности.

Степень эрозии и сглаживания кратеров различна. Например, хорошо заметные лучевые структуры говорят о том, что она невелика, в то же время у ряда кратеров сохранились едва заметные кромки. В целом меркурианские кратеры по сравнению с лунными менее глубокие, что также можно объяснить большей кинетической энергией метеоритов из-за большего, чем на Луне, ускорения силы тяжести на Меркурии. Поэтому образующийся при ударе кратер эффективнее заполняется выбрасываемым материалом. По этой же причине вторичные кратеры рас-

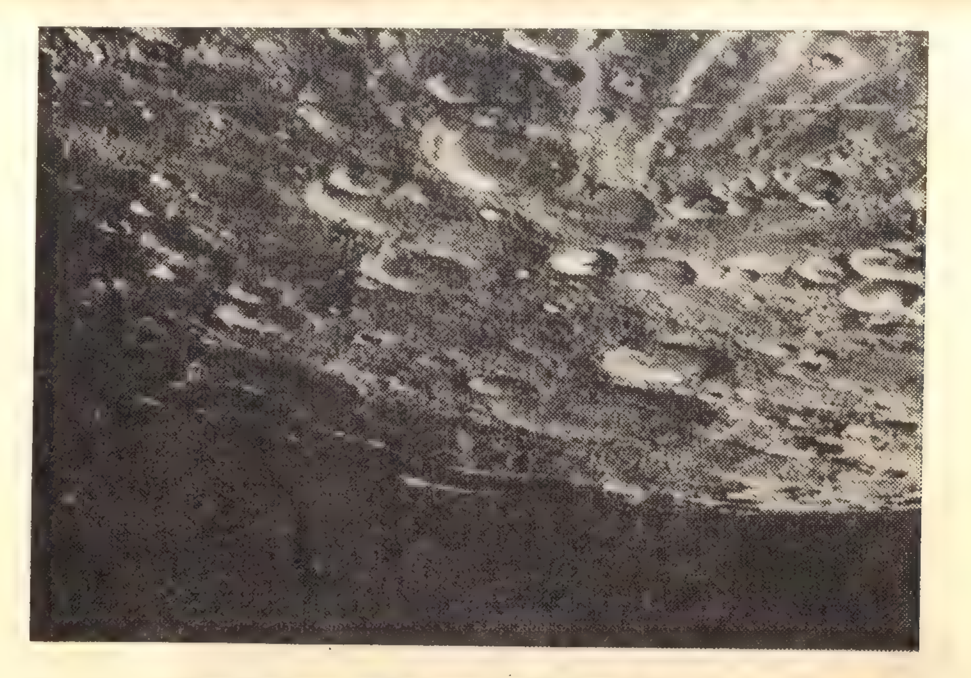


Рис. 17. Фототелевизионное изображение поверхности Меркурия вблизи южного полюса. Полюс находится на лимбе, в центральной части крупного кратера поперечником 180 км (фото «Маринера-10»).

положены ближе к центральному, чем на Луне (баллистические траектории круче), и отложения раздробленного материала в меньшей степени маскируют первичные формы рельефа. Сами вторичные кратеры глубже лунных,

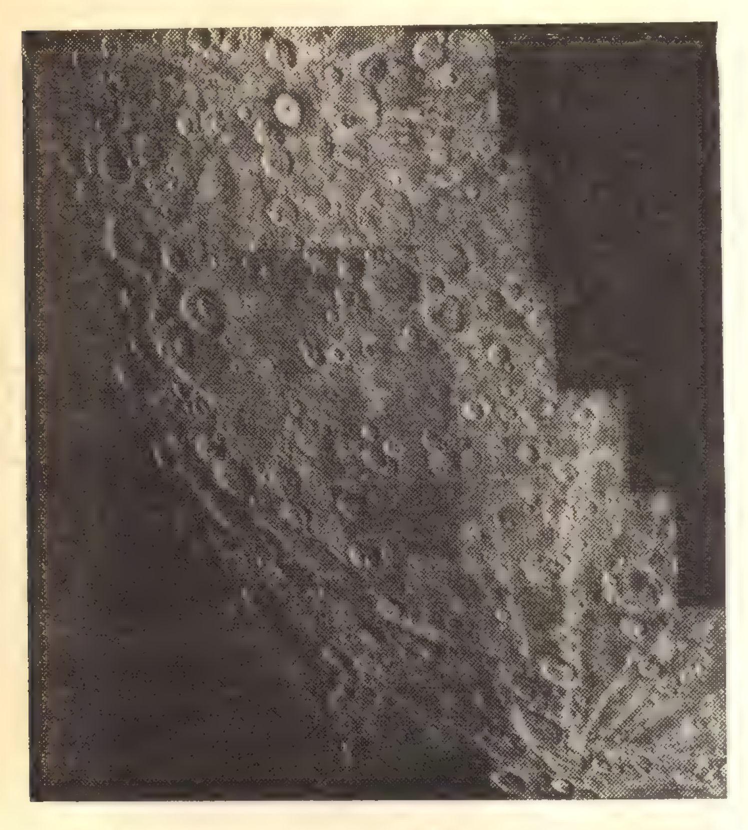


Рис. 18. Мозаика снимков поверхности Меркурия средних и высоких широт у терминатора. Хорошо видны лучевые структуры у кратеров в нижней и верхней части изображения (снимки «Маринера-10»).

что опять же объясняется тем, что выпадающие на поверхность осколки испытывают большее ускорение силы тяжести.

Так же, как и на Луне, можно в зависимости от рельефа выделить преобладающие неровные «материковые» и значительно более гладкие «морские» районы. Последние

преимущественно представляют собой котловины, которых, однако, существенно меньше, чем на Луне, их размеры обычно не превышают 400—600 км. К тому же некоторые котловины слабо различимы на фоне окружающего рельефа. Исключение составляет упоминавшаяся обширная котловина Калорис (Море Зноя) протяженностью около 1300 км, напоминающая известное Море Дождей на Луне. Возможно, что имеются и другие подобные котловины на оставшейся пока неотснятой большей части поверхности планеты. Морфология обрамляющих валов, поля вторичных кратеров, структура поверхности внутри котловины Калорис дают основания предполагать, что при ее формировании было выброшено больше материала, чем при образовании Моря Дождей, и что в дальнейшем могли последовательно происходить процессы дополнительного проседания и поднятия дна, связанные с возможным оттоком магмы и изостатическим выравниванием (за счет которого обеспечивается равновесное состояние участка коры).

В преобладающей материковой части поверхности Меркурия можно выделить как сильно кратерированные районы, с наибольшей степенью деградации кратеров, так и занимающие обширные территории старые межкратерные плоскогорья, свидетельствующие о широко развитом древнем вулканизме. Это наиболее древние сохранившиеся формы рельефа планеты. Равнинные районы морей и примыкающих к ним участков сформировались в более позднюю эпоху. Об этом можно судить по слабой насыщенности равнин относительно свежими кратерами, в большинстве своем небольших размеров. Выравненные поверхности котловин, очевидно, покрыты наиболее толстым слоем раздробленных пород — реголита. Наряду с небольшим числом кратеров здесь встречаются складчатые гребни, напоминающие лунные. Некоторые из примыкающих к котловинам равнинных участков, вероятно, образовались при отложении выброшенного из них материала. Вместе с тем для большинства равнин найдены вполне определенные свидетельства их вулканического происхождения, однако это вулканизм более позднего времени, чем на межкратерных плоскогориях. Создается впечатление, что по своей морфологии и возрасту эти районы Меркурия примерно аналогичны районам лунных морей и равнинных поверхностей Марса, образование которых обычно датируется периодом на рубеже около

3—4 млрд. лет назад. К этому периоду относят завершение этапа наиболее интенсивной (после фазы аккумуляции) бомбардировки планет крупными телами, в результате чего и образовались «моря» и другие крупные, иногда менее четко проявляющиеся, кратеры.

Если теперь сопоставить количество больших котловин и кратеров диаметром более 200 км на Меркурии, Луне и Марсе, то оказывается, что их плотность приблизительно обратно пропорциональна площади поверхностей этих небесных тел, в то время как их поперечники отличаются всего вдвое. Отсюда следует, что число метеоритов в областях пространства, занимаемом этими планетами, могло быть примерно аналогичным. Понять это не так просто, как может показаться на первый взгляд. Ведь обычно исходят из представлений о том, что основным регулярным источником метеоритов, «поставляемых» во внутренние области Солнечной системы, служит астероидный пояс, а планеты находятся от него на разных расстояниях. Однако, если принять во внимание, что помимо этого основного источника могут быть и другие подобные скопления астероидных тел за орбитой Плутона (см. рис. 9), также выполняющие «функции поставщиков», различие в расположении ближайших к Солнцу планет становится несущественным.

Такое предположение нам кажется более вероятным, нежели приходящие на помощь в подобных случаях разнообразные «катастрофические» гипотезы, в которых обычно нет недостатка. На этот раз для объяснения наблюдаемых закономерностей была предложена гипотеза о катастрофическом разрушении астероида за счет приливных сил при его прохождении вблизи Земли и Венеры и последующего выпадения осколков. Осколки могли бы тогда распределиться в пределах области расположения планет земной группы приблизительно равномерно. При всей внешней привлекательности такого сценария это, по-видимому, как раз тот случай, когда применим известный философский принцип, что не надо изобретать сущностей сверх необходимых. Другими словами, не искать экзотических объяснений там, где можно ограничиться более простыми.

Анализируя основные черты поверхности Меркурия, мы обращали внимание как на многие сходства, так и на существенные различия с Луной. Внимательное изучение обнаруживает еще одну интереснейшую особенность,

проливающую свет на историю формирования планеты. Речь идет о характерных следах тектонической активности в глобальном масштабе в виде специфических крутых уступов, или откосов — эскарпов. Эскарпы имеют протяженность приблизительно от 20 до 500 км и высоту склонов от нескольких сот метров до 1—2 км. По своей морфологии и геометрии расположения на поверхности



Рис. 19. Эскарп (*AB*) на поверхности Меркурия. Эскарп пересекает два кратера диаметром 55 км и 35 км. Показана часть эскарпа, общая длина которого превышает 500 км.

они отличаются от обычных тектонических разрывов и сбросов, наблюдаемых на Луне и Марсе, и скорее образовались за счет надвигов, наслоений вследствие напряжений в поверхностном слое, возникших при сжатии Меркурия. Об этом свидетельствует горизонтальное смещение валов некоторых кратеров, как это показано, например, на рис. 19. Здесь эскарп длиной 130 км, имеющий название Восток, пересекает два кратера. У кратера поперечником 65 км, расположенного в центре, четко видно смещение вала примерно на 10 км, что, очевидно, было вызвано уменьшением размеров кратера при общем сокращении площади коры планеты. По оценкам извест-

ного геолога Р. Строма это сокращение составило около 100 тыс. км^2, что эквивалентно уменьшению радиуса Меркурия примерно на 1—2 км. Цифры эти небольшие, если отнести их к общей площади поверхности или радиусу Меркурия, однако сам процесс имел громадные последствия для формирования рельефа.

Некоторые из эскарпов подверглись ударной бомбардировке и частично разрушены. Это означает, что они образовались раньше, чем кратеры на их поверхности. По степени эрозии этих кратеров можно прийти к заключению, что сжатие коры происходило в период образования «морей» около 4 млрд. лет назад. Наиболее вероятной причиной сжатия нужно, видимо, считать начало остывания Меркурия, к тепловой истории которого мы еще вернемся. Согласно другому интересному предположению, выдвинутому рядом специалистов, альтернативным механизмом мощной тектонической активности планеты в этот период (с образованием сдвигов, сжатий и растяжений, проявляющихся по-разному на разных широтах) могло быть приливное замедление вращения планеты от первоначально предполагаемого значения около 8 час — в 175 раз больше существующего! Действительно, ряд хребтов, желобов, линейчатых сегментов валов и эскарпов обладает преимущественной ориентацией в меридиональном направлении, с небольшими отклонениями к западу и к востоку, что как-будто благоприятствует этой гипотезе. Вместе с тем нельзя исключить и того, что эти черты поверхности запечатлели внутренние напряжения в коре планеты под воздействием приливных возмущений от Солнца, игравших особенно важную роль при образовании таких структур в процессе сжатия Меркурия.

РЕЛЬЕФ ПОВЕРХНОСТИ МАРСА

Еще совсем недавно довольно далеко идущие аналогии с Луной распространялись и на Марс. Они возникли во второй половине 60-х годов, после того как с пролетных аппаратов «Маринер-4, 6, 7» были получены первые фотоснимки нескольких сравнительно небольших районов поверхности планеты в южном полушарии. Снимки, которых с таким нетерпением ждали, принесли разочарования. Отснятые районы изобиловали кратерами, в большинстве своем сильно разрушенными и чем-то дей-

ствительно напоминавшими лунные. Основываясь на этой весьма ограниченной информации, о Марсе стали говорить как о мертвой планете не только в биологическом, но и в геологическом смысле. Это сильно ослабило традиционный интерес к нему исследователей и широкой общественности, длительное время подогревавшийся такими экзотическими феноменами, как «сезонная смена растительного покрова», «каналы» и т. п. Как мы дальше увидим, попытки интерпретации наблюдательных данных в этих терминах действительно оказались неправомерными. Однако дальнейшие исследования, особенно энергично развернутые после запуска первых искусственных спутников Марса в 1971 году (советские «Марс-2» и «Марс-3» и американский «Маринер-9») не просто возродили, а значительно усилили былой интерес к этой планете, по существу открыв нам новый Марс.

Особенно эффективными оказались результаты глобального картирования Марса путем передачи телевизионных изображений и фотографирования его поверхности со спутников «Маринер-9», «Марс-5» и «Викинг-1, 2». Изображения получены в основном с разрешением около 1 км, но отдельные участки исследованы при разрешении до 40—50 м, т. е. в 10 000 раз лучше, чем при наблюдениях с Земли! Это дало, наконец, возможность увидеть, что же представляют собой наблюдаемые в телескоп на диске Марса темные и светлые области, понять, с чем связаны периодические изменения их очертаний и контрастов, сколь реальны границы других слабых, едва различимых пятен, как выглядят полярные шапки. Последовательные съемки одних и тех же районов за период, превышающий марсианский год, равный почти двум земным годам, позволили проследить динамику сезонных колебаний и влияние атмосферных процессов на морфологию марсианской поверхности.

Изучению структуры и рельефа поверхности во многом способствовали также одновременные измерения в других диапазонах длин волн — инфракрасном, ультрафиолетовом, сантиметровом. По величине эффективного рассеяния излучения в ультрафиолетовой части солнечного спектра «столбом» атмосферы, находящимся непосредственно под спутником, можно определить, какова оптическая толщина этого «столба» над соответствующим участком поверхности, а значит, высоту этого участка относительно некоторого среднего уровня. Таким спосо-

бом измерялся высотный профиль поверхности вдоль трассы орбиты спутника, а так как планета под спутником вращается, то последовательный сдвиг измеряемых участков позволяет получить глобальный охват. Другой независимый, но по своей идее близкий к первому метод определения высоты основан на измерении степени поглощения молекулами атмосферы отраженного солнечного излучения в одной или нескольких характерных полосах в ближней инфракрасной области спектра. Такие измерения также позволяют оценить оптическую толщину атмосферного столба над данным участком поверхности, зависящую от рельефа местности. Эти методы хорошо дополняют данные о рельефе, получаемые непосредственно из анализа изображений, с учетом направления оси объектива и положения Солнца над местным горизонтом в момент фотографирования. Наконец, фотометрические измерения степени отражения поверхностью солнечного света в зависимости от длины волны и степени его поляризации дают сведения о характеристиках грунта, физической природе частиц.

Что же на самом деле представляет собой поверхность Марса? Прежде всего оказалось, что уже отмечавшееся различие в расположении средних уровней поверхности северного и южного полушарий из-за несимметричности фигуры довольно отчетливо проявляется и в морфологии рельефа: в северном преобладают равнинные области, в южном — кратерированные. Выделяются крупные, поперечником свыше 2000 км, котловины («моря»), такие как Эллада, Аргир, Амазония, Хрис, и возвышенные плато («материки») — Фарсида, Элисиум, Тавмасия и др. Последние по своим размерам близки к земным континентам и возвышаются на 4—6 км над уровнем средней поверхности, который соответствует экваториальному радиусу планеты 3394 км. Если бы на Марсе существовали океаны, как на Земле, они бы заполнили обширные пространства котловин, а эти плато действительно выделялись бы как материки.

Физиография марсианской поверхности представлена разнообразными формами рельефа (рис. 20, 21 и 22). Помимо обширных кратерированных районов, были обнаружены прямые свидетельства тектонической и вулканической деятельности в виде характерных вулканических конусов и разломов, сочетания относительно более молодых и древних структур, довольно четкие следы воз-

действия различных эрозионных факторов и процессов осадконакопления.

Подавляющее большинство сосредоточенных преимущественно в средне- и высокоширотных районах южного полушария кратеров — ударного происхождения, с различной степенью стирания, или выглаживания за счет



Рис. 20. Кратерированная поверхность Марса в южном полушарии. Центр снимка находится на 32° ю. ш., 35° з. д., размер области 700×700 км; вверху справа кратер Холден с поперечником в 150 км; в центре кратер Бонд с поперечником 100 км, между ними протянулась долина Узбой. Слева — извилистая долина Ниргал. Снимок «Марса-5».

последующих процессов (в научной литературе называемого облитерацией). По степени облитерации, прежде всего по характеру разрушения кромок, или валов склонов, можно судить о возрасте кратера и об интенсивности процессов, приведших к сглаживанию. В целом кратеры на Марсе более мелкие, чем на Луне и Меркурии, но значительно глубже, чем на Венере. Внешние склоны валов типичных кратеров имеют углы около 10°, внутренние стенки наклонены на 20—25°. Как правило, у них плоское дно, заполненное эродированным материалом.

Преобладающие формы рельефа северного полушария непосредственно связаны с активными геологическими процессами. В первую очередь внимание привлекает проявление вулканизма — громадные конусообразные горы с четко очерченными впадинами на вершинах — кальдерами. Такие впадины образуются при частичном обрушении вулканического сооружения, сопровождающем сильные извержения. Четыре вулкана в области Фарсида в несколько раз больше существующих на Земле.



Рис. 21. Мозаика снимков поверхности Марса «Маринером-9», охватывающая область от 30° с. ш. до 30° ю. ш. и от 10° до 140° з. д. Видно разнообразие поверхностных структур. В левой верхней части — вулканические конусы, крайний из которых, Олимп, свыше 500 км в основании. Вдоль экватора протянулась долина Маринера — громадный каньон длиной свыше 4000 км, шириной 120 км и глубиной 5—6 км. В нижней части снимка в центре видны пылевые языки у кратеров, указывающие направление ветра.

Крупнейшие вулканические конуса называются Арсия и Олимп. Они достигают 500—600 км в основании, высота Арсии 27 км, а Олимпа — 24 км. Поражают воображение не только высота этих гор, но и диаметры кратеров на их вершинах: около 100 км у Арсии и 60 км у Олимпа. С этими размерами действительно не может сравниться ни одно из подобных образований на нашей планете. Например, крупнейший вулкан Мауна-Лоа на Га-

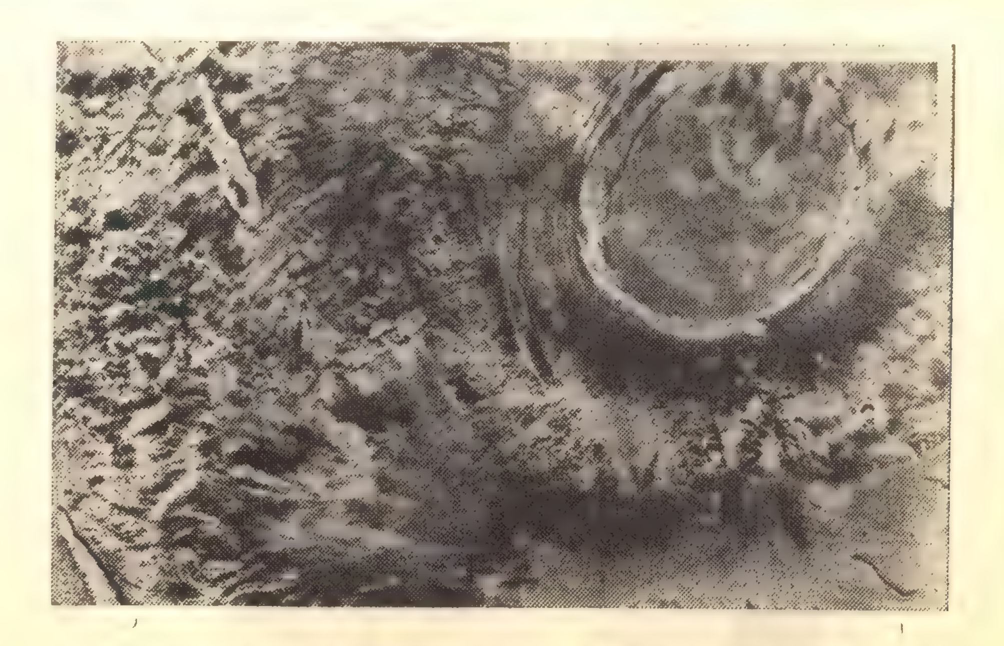


Рис. 22. Самый крупный вулканический конус на Марсе — Арсия Монс. Его высота 27 км, диаметр кратера на вершине (кальдеры) около 100 км (снимок «Викинга-1»).

вайских островах приблизительно втрое меньше и по высоте (считая высоту подводной части 4,5 км), и по диаметру основания, а поперечник его центрального кратера — всего 6,5 км. Олимп — это хорошо известное астрономам одно из наиболее светлых пятен, наблюдаемых на диске Марса, обозначавшееся на прежних картах как

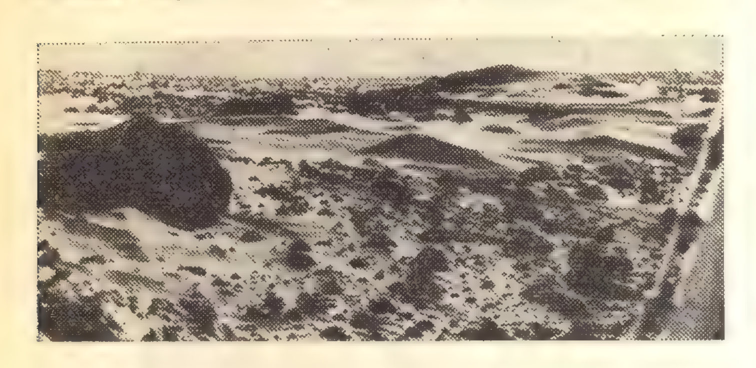




Рис. 23а. Панорама марсианской поверхности в месте посадки «Викинга-1». Видны песчаные дюны и остроугольные камни.

Никс Олимпика (Снега Олимпа). Само название говорит за то, что его считали возвышением; мало кто мог, однако, предполагать, что это возвышение столь грандиозно по своим размерам. Только в самое последнее время мы постепенно начинаем, кажется, привыкать к таким «сюрпризам» на планетах: вспомним о подобных образованиях на Венере, в областях Максвелл, Гаусс и Герц, хотя высоты их значительно меньше, чем на Марсе.



Рис. 23б. Панорама марсианской поверхности в месте посадки «Викинга-2», отличающаяся обилием ноздреватых камней типа пемз с характерными сколами, очевидно, являющихся остатками лавовых потоков.

Отсутствие в областях Марса, где сосредоточены вулканы, кратеров ударного происхождения, а также хорошо сохранившиеся следы лавовых потоков на склонах гор позволяют предположить, что вулканы действовали еще сравнительно недавно (по оценкам не более нескольких сотен миллионов лет назад). Свидетельства широко развитого вулканизма на планете дают также хорошо сохранившиеся остатки лавовых потоков на панорамах, переданных с посадочного аппарата «Викинг-2». Место посадки на обширной марсианской равнине Утопия буквально усыпано многочисленными камнями, с характерными сколами и ноздреватыми поверхностями типа пемз (рис. 23). Подобные продукты раздробления пемзовых лав в виде обломочных рыхлых глыб часто встречаются у нас на Земле.

Об интенсивной тектонической активности свидетельствуют многочисленные разломы и сбросы марсианской коры, образовавшие утёсы, грабены, обширные ущелья с системой ветвящихся каньонов (см. рис. 21). Они достигают нескольких километров в глубину, десятков километров в ширину, сотен и даже тысяч километров в длину. Так, обширный разлом вблизи экватора, протянувшийся в западно-восточном направлении более чем на 4000 км, названный долиной Маринера, напоминает рифтовую зону на океаническом ложе Земли. Сетки мощных каньонов зачастую отделены друг от друга плоскими плато или горами с плоскими вершинами и крутыми склонами, которые сложены наиболее прочными породами, противостоящими разрушению. Такие горы называют столовыми. Очевидно, эти образования, а также цепочки кратеров при наблюдении с Земли и создавали иллюзию марсианских «каналов» — одной из наиболее известных и притягательных гипотез в истории астрономии конца XIX и первой половины XX столетий.

Было бы ошибочно думать, что вплоть до передачи фотоснимков поверхности Марса с космических аппаратов астрономы свято верили в то, что такие каналы действительно существуют. И тем более разделяли безграничную веру в их искусственное происхождение выдающегося исследователя Марса замечательного американского астронома Персиваля Ловелла, отдавшего изучению этой волнующей проблемы более двадцати лет жизни. Совсем нет. Уже в период, когда работал Ловелл, велись ожесточенные споры вокруг вопроса о каналах, и другие круп-

нейшие астрономы, среди них Эдуард Барнард и Эжен Антониади, подвергали сомнению сам факт их существования. А известный испанский астроном Комас Сола после великого противостояния Марса 1909 года, вопреки утверждениям Ловелла, открывшего в этот период несколько сот новых каналов, писал: «Это противостояние, по моему мнению, можно рассматривать как окончательный разгром теории о геометрической сети каналов». Тем не менее, споры продолжались еще несколько десятилетий.

В чем же дело? Почему различные группы одинаково квалифицированных наблюдателей приходили к прямо противоположным выводам? Вопрос этот совсем не прост и, видимо, непосредственно связан прежде всего с условиями наблюдений, но вместе с тем и с особенностями марсианской поверхности. К тому же особую остроту полемике (с сенсационной окраской, обычно широко подхватываемой неспециалистами, но мешающей поиску истины) придавали попытки приписать паутину более или менее упорядоченных тонких прямых линий на диске планеты деятельности разумных существ, высокоразвитой цивилизации. Между тем, справедливости ради, следует напомнить, что впервые употребивший в 1859 г. слово «canali» для обозначения некоторых очертаний на поверхности Марса итальянский астроном Анджело Секки вкладывал в него совсем иной смысл. В переводе с итальянского оно означает «пролив», «проток», а не ирригационное сооружение. В известном смысле условно был использован этот термин и другим замечательным итальянским астрономом Джованни Скиапарелли, с именем которого связывают открытие каналов во время очередного великого противостояния Марса 1877 года.

Сильнейшим аргументом противников существования каналов был хорошо известный факт (который легко может проверить каждый), что вследствие ограниченной разрешающей способности человеческого глаза более или менее произвольные сочетания пятен на большом расстоянии сливаются в линии, полосы. То же самое может происходить при наблюдении в телескоп, если его разрешение недостаточно, чтобы различить отдельные детали на поверхности. И действительно, многократно сообщалось о том, что при переходе к наблюдениям при помощи более мощных инструментов и улучшении условий видимости наблюдавшиеся до этого прямые ли-

нии каналов исчезали или, точнее, распадались на множество отдельных более естественных по своему виду деталей неправильной формы.

Другая причина может быть отнесена за счет самой поверхности Марса, ее рельефа, наличия протяженных трещин, борозд и других конфигураций. Правда, попытки отождествить наблюдавшуюся геометрическую сеть каналов по многочисленным зарисовкам и фотографиям с реальной морфологией поверхности не привели к ожидаемому сходству. Нельзя, однако, забывать о том, что многие конфигурации на Марсе претерпевают регулярные периодические изменения, а часть из них может иметь более устойчивый характер. Это обусловлено особенностями взаимодействия атмосферы с поверхностью.

Вследствие наличия атмосферы и значительной эффективности эрозии на Марсе кратеры метеоритного происхождения сильно модифицированы. В свою очередь образовалось огромное количество пыле-песчаного материала, что стало характерной чертой марсианской поверхности. В условиях безводной среды это приводит к ряду интересных эффектов. Перемещение пыли ветром, обусловленное как локальными метеорологическими, так и глобальными циркуляционными процессами на планете, вызывает периодические изменения очертаний светлых и темных областей, причем темные области систематически на несколько градусов теплее светлых. В относительно спокойные периоды тонкозернистый материал преимущественно скапливается в углублениях, а при сильных ветрах выдувается из них, образуя характерные светлые шлейфы у кромок кратеров, ориентированные в направлении ветра. Эта преимущественная ориентировка может сохраняться в течение определенного времени и внутри кратеров, где преобладающими становятся более крупные частицы песка и пыли. На снимках, сделанных с высоким разрешением, на дне таких кратеров обнаружены песчатые дюны, напоминающие барханы земных пустынь (рис. 24). Следы пылевых наносов отчетливо видны также на панорамах, переданных из района Хриса, где совершил посадку «Викинг-1» (см. рис. 23, 25).

С переносом пыли и динамикой сезонных изменений полярных шапок связана и природа знаменитой «волны потемнения», распространяющейся с наступлением весны от широты примерно 70° к экватору со скоростью около 5 м/сек, так что до экватора она докатывается меньше

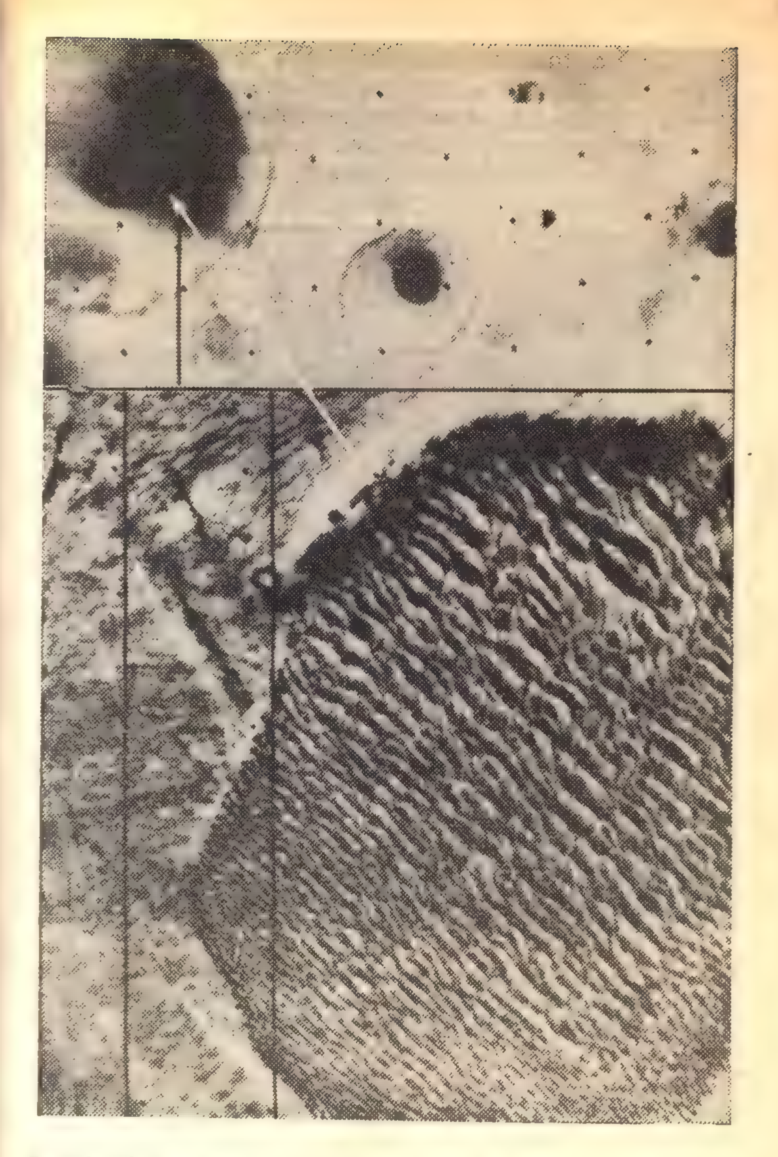


Рис. 24. Образование песчаных дюн внутри марсианских кратеров, кажущихся темными пятнами на снимках с малым разрешением (сверху). Поперечник кратера, показанного в крупном масштабе снизу, 150 км, расстояние между дюнами около 1 км (снимок «Маринера-9»).

чем за два земных месяца, покрывая расстояние свыше 4000 км. К лету, когда шапка уменьшается до минимальных размеров, темная полоса достигает широты 40° в противоположном полушарии, а к осени, с началом роста шапки, быстро откатывается назад, и «моря» светлеют.



Рис. 25. Панорама поверхности Марса в районе Хриса за 15 мин до захода Солнца. На переднем плане — углубление; размеры наиболее крупных камней до 30 см (снимок «Викинга-1»).

В увлекательной теории Ловелла это объяснялось весенним пробуждением и быстрым распространением растительности вдоль живительных артерий — каналов, заполняемых водой с началом таяния шапки. Эта воистину грандиозная ирригационная система высокоразвитых марсиан естественно рассматривалась им как единственно мыслимое средство противостоять суровой природе на планете, преобладающими ландшафтами которой яв-

ляются пустыни, а вода в условиях сухой и менее плотной, чем земная, атмосферы быстро испаряется. Темные ленты каналов Ловелл связывал не с водой, а с растительностью, подобно тому, как наблюдая, скажем, с Марса район Сахары на Земле марсиане видели бы не сам разлив Нила, а орошаемую им цветущую долину на желтом фоне пустыни.

К сожалению, действительность, как это часто бывает, оказалась куда более прозаической, хотя с физической точки зрения исключительно интересной. Дело в том, что сезонная перестройка циркуляционной системы приводит к переносу ветрами, дующими из более холодных полярных областей, тонкозернистого материала, обладающего повышенной отражательной способностью, вследствие чего обнажаются относительно более темные участки поверхности. Большое количество светлого сыпучего материала, скапливающегося в крупных почти круговых котловинах типа Эллады, сглаживает неоднородности поверхности на их дне, что при наблюдении с Земли создает впечатление светлых равнин.

Обилие и интенсивный перенос пыли объясняют и то, почему не было найдено сколь-нибудь определенной взаимосвязи неоднородностей рельефа с отражательными свойствами (альбедо) поверхности Марса, а также почему для большинства районов планеты характерна малая плотность грунта. Альбедо поверхности претерпевает значительные изменения, и многие черты рельефа попросту маскируются. Ситуация приобретает глобальный характер в периоды пылевых бурь — грандиозного природного явления, зачастую охватывающего всю планету, которое не случайно называют «пылевыми дьяволами». Пыль поднимается на высоту до 10 и более километров, так что выступающими над этой сплошной пеленой оказываются только вершины крупнейших вулканов, а вся остальная поверхность приобретает ровный желтый фон, без каких-либо деталей.

РЕКИ И ЛЕДНИКИ НА МАРСЕ

Бомбардировка метеоритами, глобальная тектоника, широко развитый вулканизм и ветровая эрозия (ее часто называют эоловой по имени повелителя ветров в древнегреческой мифологии Эола) — не единственные активные процессы, формировавшие поверхность Марса.

На фотоснимках, переданных космическими аппаратами, обнаруживаются длинные ветвящиеся долины протяженностью в сотни километров, по своей морфологии напоминающие высохшие русла земных рек, выглаженные ложбины и другие характерные конфигурации, свидетельствующие также о водной и ледниковой (флювиогляциальной) эрозии (рис. 26 и 27). Это приводит к предположению, что в некоторый период марсианской истории поверхность планеты бороздили потоки воды, обра-

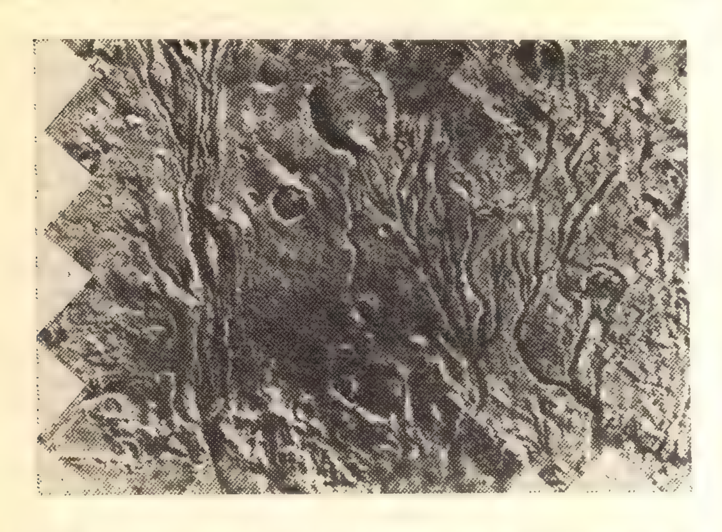


Рис. 26. Дендритовые русла на поверхности Марса, очевидно, оставленные реками с хорошо развитой системой притоков; размер снимка 300×400 км, уклон поверхности от истока к устью 2—3 км (снимок «Викинга-1»).

зовавшие меандровые русла (по имени извилистой реки Меандр в Малой Азии) с развитой системой притоков, и перемещались ледники. Они образовали в областях ледникового сноса, при обтекании кратеров, каплевидные острова и другие формы разрушения горных пород и выпахивания поверхности, или, как говорят, экзарации. Например, на рис. 27 отчетливо видны следы мощного выглаживания, вероятнее всего оставленного ледниками, но возможно определенную роль здесь сыграла и вода, при течении которой образовались протоки между локальными уплотнениями материала поверхности. На-

ибольшие уплотнения, однако, связаны с кратерами ударного происхождения, поперечники которых на рис. 27 достигают 10—15 км.

О водном происхождении сохранившихся многочисленных русел, общее число которых оценивается в несколько десятков тысяч, говорит и факт перепада высот в направлении течения древних рек, от истока к устью. Часть этих русел протянулась между углублениями на

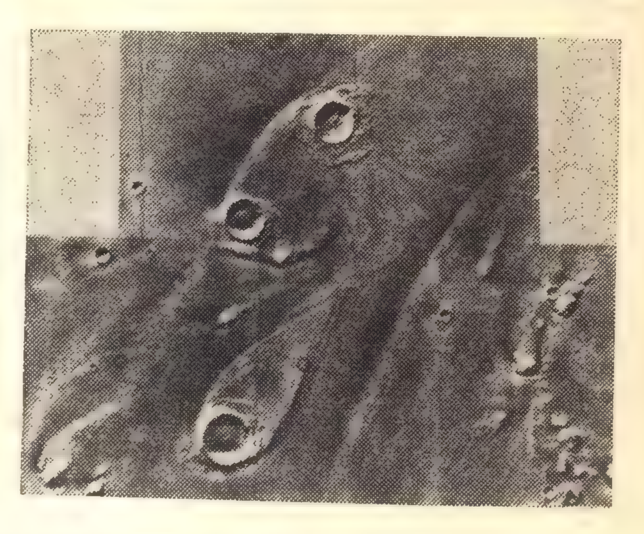


Рис. 27. Выглаженные ложбины марсианской поверхности с характерными каплевидными островами около кратеров, вероятно, оставленные движущимися ледниками, возможно с участием потоков воды; размеры кратеров 10—15 км (снимок «Викинга-1»).

кратерированных участках поверхности, по-видимому, служивших местными водными резервуарами. Это хорошо видно на рис. 26, где протяженность русел между кратерами в области Хриса составляет свыше 300 км, при перепаде высот около 3 км.

Насколько древними являются речные русла, корытообразные (троговые) долины, оставленные ледниками, и некоторые другие образования, явно свидетельствующие о присутствии воды на поверхности Марса? К какому периоду (или периодам) марсианской истории относятся эти события? Данная проблема, как и проблема общих запасов воды на Марсе, непосредственно связана с палео-

климатом планеты, химическим составом и эволюцией ее атмосферы, о чем мы еще поговорим отдельно. Пока лишь отметим, что четкость многих сохранившихся флювиогляциальных форм, отсутствие следов их захоронения позднейшими наслоениями указывают на относительно недавнее происхождение, в пределах последнего миллиарда лет. По конфигурации некоторых желобов на склонах возвышенностей можно даже предполагать, что когда-то с них стекали дождевые потоки — ситуация, совершенно невозможная в современных условиях на Марсе при ничтожном содержании в атмосфере водяного пара и очень низком давлении у поверхности, при котором вода в жидком виде практически не удерживается, быстро испаряясь.

Исходя из общих геохимических закономерностей о высвобождении воды из планетных недр, подкрепленных теперь явно выраженными признаками вулканической деятельности на всех планетах земной группы, многие исследователи уже давно высказывали идею о том, что основные водные массы на Марсе сосредоточены в приповерхностном слое вечной мерзлоты, особенно в слоях наносов и в крупных равнинных бассейнах типа Эллады. Не исключалась даже возможность того, что за счет обычного геотермического температурного градиента внутри этих бассейнов под слоем льда температура может оказаться достаточной для сохранения воды в жидком состоянии. Так считали А. И. Лебединский, В. Д. Давыдов.

В пользу представлений о существовании на Марсе обширных районов вечной мерзлоты действительно свидетельствует ряд деталей. К ним, в частности, относятся специфические долины с обнажением на их склонах внутренних пустот типа карстовых на Земле (рис. 28). Весьма вероятно, что они образовались при первоначальном обнажении и последующей сублимации ледяных прослоев (линз) и что подобных резервуаров, покрытых сыпучим грунтом, сохранилось на Марсе довольно много. Примерно аналогичную природу могут иметь встречающиеся на планете территории с хаотическим рельефом, содержащие замысловато изломанные блоки горных пород. Они вероятнее всего образовались за счет проседания наружных слоев вследствие ухода подповерхностного материала. О районах вечной мерзлоты свидетельствуют также специфические формы выбросов на внешних склонах некоторых кратеров, напоминающие снежные

лавины (рис. 29). Происхождение таких конфигураций, не имеющих аналогов на других планетах, можно объяснить плавлением подповерхностного льда при падении метеоритов и стеканием грязевых потоков по склонам образовавшегося кратера.

Обширные области вечной мерзлоты на Марсе дают основание предположить наличие на его поверхности



Рис. 28. Пример образования долины на марсианской поверхности, очевидно обусловленной таянием подповерхностного льда и напоминающей карстовые явления на Земле. Размер снимка 300×300 км (снимок «Викинга-1»).

изверженных пород типа палагонитов — стекловатого минерала желто-бурого (или темно-бурого) цвета, встречающегося на Земле в базальтах, диабазах и туфах преимущественно в полярных районах (тундра Большой Земли, Исландия, Земля Франца-Иосифа, Антарктида). Палагониты образуются при взаимодействии магмы с водой или при извержении ее сквозь ледовую толщу. Они богаты железом и обеднены кремнием, что как раз подтверждается анализом элементного состава пород на поверхности Марса. Вместе с тем из-за меньшего атмосферного давления марсианские палагониты могут от-

личаться от земных меньшим содержанием летучих элементов и менее прочной структурой.

Как мы видели, при определенных условиях, когда за счет падения метеорита, вулканического извержения



Рис. 29. Грязевые выбросы из кратеров, застывшие на склонах. Их образование, вероятно, связано с плавлением подповерхностного льда при ударе метеорита. Диаметр кратера 25 км, внутри его виден характерный центральный пик, образующийся при ударе (снимок «Викинга-1»).

или другого местного геотермального источника происходит таяние льда, на поверхности Марса могли бы образовываться (или вскрываться) водные резервуары. При этом естественно возникает вопрос, что происходит с ними дальше. Просто сказать (как мы уже поступили, упомянув о возможных дождевых потоках в ранней истории Марса), что в условиях разреженной атмосферы при

средней температуре у поверхности минус 50 градусов Цельсия вода испаряется или что она превращается обратно в лед, недостаточно. Проблема заслуживает того, чтобы ее исследовать подробнее, количественно, а не качественно.

Это недавно сделали известный планетолог Карл Саган вместе с Дэвидом Уоллессом. Их расчеты показали, что испарение действительно очень быстро практически прекращается за счет появления на жидкой поверхности ледяного покрова, достигающего толщины не менее метра. Чем меньше давление атмосферы, тем интенсивнее испарение и тем сильнее охлаждение поверхности за счет высвобождения скрытой теплоты испарения, а значит, толще образующийся слой льда. Эта своего рода «обратная связь» весьма эффективна, а скорость сублимации с поверхности льда, зависящая от величины приходящей к Марсу солнечной лучистой энергии (инсоляции), давления и динамических процессов (ветров и свободной конвекции) в атмосфере, незначительна. Она по крайней мере на несколько порядков величины меньше, чем скорость испарения с поверхности земных рек. В конечном итоге толщина ледяного покрова в среднем должна составлять 10—30 метров, что соответствует условиям равновесия между его ростом и сублимацией. Как известно, лед является хорошим теплоизоляционным материалом, и одновременно он достаточно прозрачен для солнечных лучей, которые частично проникают сквозь него и поглощаются в само́й водной толще. Вместе с высвобождающейся скрытой теплотой плавления на нижней поверхности льда это препятствует дальнейшему промерзанию резервуара, обеспечивая сохранение в нем жидкой воды.

Все это привело авторов к интересной гипотезе о существовании на Марсе не только обширных водоемов (озер) под слоем вечной мерзлоты, но и о продолжающемся поныне течении рек, скованных ледяным щитом только с поверхности! А если это действительно так, то естественно предположить, что формирование по крайней мере некоторых из наблюдаемых русел происходило непрерывно. Можно было бы возразить, что большинство замерзших рек вероятно покрыто песчаными наносами и что в этом случае резко уменьшается как скорость сублимации, так и количество проникающего внутрь тепла, а значит, условие равновесия смещается. Действитель-

но, в таких местах ледяной покров, вероятно, толще, однако вследствие регулярного переноса пыли условия могут изменяться.

Противоположный эффект должен наблюдаться при увеличении инсоляции, приводящей к уменьшению толщины ледяного покрова. На определенных участках поверхности, где промерзание было полным, возможно появление под слоем льда жидкой воды, так что этот слой по существу становится айсбергом. Такая ситуация могла бы, в частности, возникать в приполярных областях вследствие периодического изменения наклона оси вращения Марса относительно плоскости эклиптики, о чем мы говорили в предыдущем разделе. С этим предположением заманчиво связать обнаруженные здесь особенности морфологии поверхности. При таянии южной полярной шапки (которая в современную эпоху стаивает почти целиком вследствие заметного эксцентриситета орбиты планеты) обнажаются слои, образованные осадочными породами. В этих концентрических наслоениях вокруг полюса различается несколько сот слоев толщиной от единиц до десятков метров, имеющих вид террас. Такие структуры можно объяснить циклической деятельностью ледников полярной шапки при изменении наклона оси планеты, от которого сильно зависит интенсивность их таяния. Предполагается, что последовательные процессы отложения осадков при таянии ледников с образованием «водяных подушек» и айсбергов, частично сглаживавших при своем перемещении неровности рельефа, происходили с периодом в сотни тысяч лет (см. рис. 5).

Белые полярные шапки Марса — одна из наиболее примечательных черт на диске планеты, хорошо наблюдаемых в телескоп. Однако до недавнего времени велись споры о том, из чего состоят шапки — из обычного, водяного льда или твердой углекислоты («сухого льда»). Последнее предположение связано с тем, что на полюсах отмечается самая низкая температура поверхности Марса, —125°С. А это как раз соответствует температуре замерзания углекислоты, из которой преимущественно состоит марсианская атмосфера. Измерения с космических аппаратов показали, что в общем-то правы были защитники как той, так и другой гипотезы, однако в основной своей массе полярные шапки образованы обычным льдом. Оказалось, что интенсивный рост шапок происходит в период с начала марсианской осени до начала весны в со-

ответствующем полушарии за счет конденсации из атмосферы углекислоты. При этом образуется слой толщиной в несколько сантиметров, быстро исчезающий с наступлением весны. После этого остается нестаивающая за лето часть, имеющая температуру около —70°С, т. е. значительно превышающую температуру замерзания углекислоты. Она-то и состоит в основном из обычного льда, покрываемого, как и прилегающая поверхность, слоем углекислоты в зимнее время.

Весьма вероятно, что шапки содержат также обширные включения газовых гидратов — так называемых клатратов, представляющих собой соединения, которые образуются при внедрении молекул углекислого газа (или других газов) в пустоты кристаллической структуры водяного льда. По внешнему виду они напоминают спрессованный снег и хорошо известны прежде всего как побочный продукт при добыче природного газа. Заметим, что такие соединения могут входить в состав ядер комет наряду с обычным льдом и некоторыми другими твердыми компонентами (CH_3CN, HCN и др.). На Марсе клатраты, возможно, образуются и в средних широтах ночью, особенно внутри углублений и кратеров, как это было замечено на фотопанорамах «Викингов». С восходом Солнца конденсат быстро сублимируется. Измеренные температуры атмосферы как раз хорошо соответствуют фазовому переходу при образовании и исчезновении клатратов CO_2. Тем не менее окончательного отождествления пока не сделано, поэтому как эти, так и другие обширные белые образования на дне некоторых кратеров, обнаруживаемые на снимках с орбитальных аппаратов, получили пока условное название «белая порода».

Толщина северной полярной шапки может быть сопоставимой с толщиной ледяного панцыря Антарктиды, достигающей 4,3 км, а отношение его площади к площади земной поверхности меньше, чем нестаивающей части шапки к площади поверхности Марса. Но лед Антарктиды содержит свыше 90% запасов всей пресной воды на Земле, и нельзя исключить, что подобный резервуар существует и на Марсе.

Все, что связано с водой на Марсе — не просто крайне интересно, но и чрезвычайно важно для понимания общих проблем планетной эволюции. К сожалению, о предполагаемых водных резервуарах мы судим только по косвенным данным, прямых доказательств их существова-

ния пока нет. Эти доказательства могут дать лишь эксперименты. Какие? Ведь не ожидать же десятки или сотни тысяч лет в расчете на возможные климатические изменения на планете! Можно высадить на поверхность движущийся самоходный аппарат (марсоход), оборудованный механизмами для бурения и проведения «вскрышных работ» (своего рода экскаватор). Он должен быть способен преодолевать большие расстояния, в том числе на участках со сложным рельефом и по сыпучим грунтам. Нельзя, однако, забывать, что, в отличие от лунохода, возможности управления таким аппаратом с Земли ограничены: чтобы принять от него информацию об окружающей местности, проанализировать ее и передать команду, куда и как идти дальше, нужны уже не секунды, а десятки минут. Если провести аналогию с ходьбой, то ситуацию можно уподобить поочередному стоянию на одной ноге примерно по полчаса, ожидая сигнала, можно ли опустить другую ногу. В противном случае аппарат может, например, опрокинуться. Следовательно, он должен быть в значительной мере автономным, самоуправляемым, снабженным так называемой адаптивной системой (например, трехкоординатным лазерным дальномером и бортовой вычислительной машиной), чтобы быстро оценивать особенности местности и выбирать направления безопасного движения. Создать такой аппарат при современном уровне развития техники можно, хотя это потребовало бы больших затрат.

Другой путь — попытаться провести наблюдения с искусственного спутника Марса, однако не обычные, пассивные, которые мало что добавят к уже известным сведениям, а сопровождаемые активным воздействием на поверхность планеты. Легко может быть, например, реализована «искусственная метеоритная бомбардировка» — сброс в районы предполагаемых водных (ледовых) резервуаров капсул со взрывчатым веществом и одновременное фотографирование динамики происходящих на поверхности явлений, вместе с комплексом других измерений в оптическом и радиодиапазонах длин волн. Это позволило бы обнаружить наличие воды даже в случае ее кратковременного появления на поверхности.

Возможны, конечно, и некоторые другие методы; их подробное рассмотрение и сопоставление не входит, однако, в нашу задачу.

Как мы уже говорили, важнейшим критерием для оценок возраста тех или иных структур на поверхности планеты служит число кратеров ударного происхождения в зависимости от их размеров и степени разрушения.



Рис. 30. Ближайший спутник Марса — Фобос. Снята его сторона, постоянно обращенная к Марсу. Слева вверху — самый большой кратер Стикни, диаметром 10 км. Снизу от него хорошо видны поперечные борозды, вероятно, являющиеся трещинами, возникшими при ударе образовавшего этот кратер метеорита (снимок «Викинга-1»).

Однако в условиях сильной эрозии трудно установить истинную величину плотности кратеров на Марсе. К тому же плотность кратеров в отдельных районах может быть частично связана с позднейшей вулканической активностью, а не только с возрастом древних форм рельефа. На наиболее сильно кратерированных участках поверхности число кратеров и их распределение по размерам сравнимы со степенью насыщенности лунной поверхно-

сти, в то время как на других участках они практически отсутствуют (см. рис. 3).

Своего рода контрольную цифру для получения сравнительной оценки числа соударений, которым подверглась поверхность всей планеты за геологическую историю, дает изучение поверхности спутников Марса — Фобоса (рис. 30) и Деймоса (рис. 31). Поскольку спутники лишены атмосферы и находятся в той же области

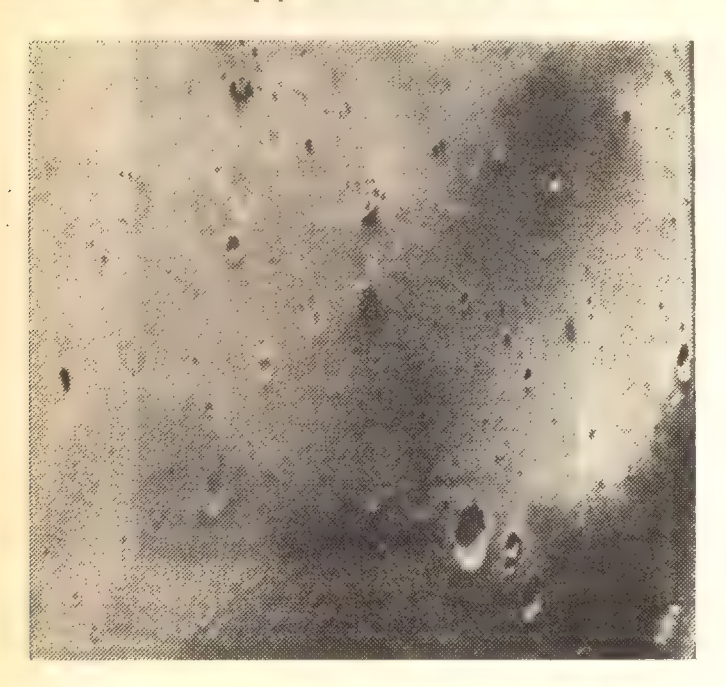


Рис. 31. Поверхность Деймоса, снятая с разрешением в несколько метров. Видны большое число мелких кратеров диаметром в 50—100 м, отдельные камни размером с небольшой дом (снимок «Викинга-2»).

Солнечной системы, что и сама планета (являясь либо конечным продуктом аккреции в начальной фазе эволюции Марса, либо, что более вероятно, захваченными на более поздней стадии астероидами), такое сравнение кажется правомерным. Оно свидетельствует об очень высокой эффективности процессов эрозии на Марсе, поскольку насыщенность кратерами поверхностей спутников выше.

Любопытно, что спутники Марса имеют очень низкую отражательную способность (альбедо меньше 5%), так что их можно отнести к наиболее темным объектам среди астероидов в Солнечной системе. Из материалов, обладающих столь низким альбедо, наиболее вероятны углистые хондриты — самый распространенный класс каменных метеоритов, содержащих наибольшее количество легких летучих элементов. Это предположение подкрепляется и малой плотностью спутников (около 2 г/см³). Видимо их поверхности покрыты слоем пыли вследствие интенсивной метеоритной бомбардировки, и поверхностный слой напоминает лунный реголит. Как показали фотоснимки, полученные с близкого расстояния «Маринером-9» и «Викингами», пылью засыпаны кратеры на Деймосе поперечником менее примерно 50 м вследствие ее сползания по склонам. Из-за малой силы тяжести и, следовательно, низкой скорости убегания, которую обычно называют второй космической скоростью (для Фобоса она всего около 13 м/с, а для Деймоса около 8 м/с), можно ожидать повышенной плотности пылевых частиц вдоль орбит спутников, образования своего рода пылевых торов.

На фотоснимке поверхности Деймоса, полученном с наиболее высоким разрешением (см. рис. 31), различимы даже отдельные глыбы неправильной формы поперечником в десятки метров (т. е. размером с небольшой дом), видимо представляющие собой следы выбросов из кратеров при ударе метеорита или его фрагменты. Наиболее впечатляющей особенностью поверхности Фобоса (см. рис. 30) являются линейчатые структуры типа желобов, которые ориентированы примерно перпендикулярно оси, направленной к Марсу. Для объяснения происхождения этих структур высказывались различные гипотезы, в том числе кажущееся вполне правдоподобным предположение о приливных эффектах, значительно более эффективных, чем оказываемые Землей на Луну, и приведших к образованию «складок». Иной подход связывался с наличием трещин, возникших за счет внутренних напряжений при торможении в процессе гипотетического захвата этого тела из астероидного пояса на сравнительно близкую орбиту вокруг Марса.

Более тщательное изучение дало дополнительные свидетельства в пользу предположения, что это на самом деле трещины, а не складки, хотя по своей морфологии

они достаточно сложные, видимо вследствие взаимодействия с поверхностным реголитом. Но при этом оказалось, что крупный кратер Стикни диаметром около 10 км, видимый в левой верхней части рис. 30, и борозды на поверхности Фобоса — события однозначно связанные друг с другом. Наиболее крупные, четко выраженные трещины, имеющие ширину от 100 до 200 м и глубину от 10 до 20 м, находятся вблизи кратера, образовавшегося от удара крупного метеорита — события почти катастрофического для небольшого тела, состоящего из углистых хондритов (материала, слабого по своей механической прочности), едва не приведшего к его разрушению. На противоположной кратеру стороне трещины меньше, а самая крупная, непосредственно примыкающая к Стикни, имеет ширину 700 м и глубину 90 м! Эти размеры просто грандиозны, если вспомнить, что максимальный поперечник Фобоса всего 27 км, а минимальный — 19 км.

Исходя из скорости кратерообразования на небесных телах в районе орбиты Марса (она здесь примерно вдвое выше, чем, например, в районе Земля — Луна) и плотности кратеров на Фобосе, возраст борозд оценивается в 3,4 млрд. лет. По крайней мере он не меньше 1 млрд. лет, если предположить, что по каким-либо причинам интенсивность бомбардировки крупными метеоритами вблизи астероидного пояса была аномально высокой. Было ли это единственное «почти катастрофическое» событие в истории спутников Марса? Этого мы не знаем, хотя вполне резонно допустить, что могли произойти другие крупные катастрофы и что существующие сейчас спутники представляют собой фрагменты более крупных родительских тел. Правда, обзорное фотографирование с «Викингов» не привело к обнаружению других «осколков» размером более примерно 1 км; однако не следует забывать, что охваченная наблюдениями область пространства была ограниченной. К тому же надо учесть, что за период в миллиарды лет могла произойти сложная эволюция их орбит.

СПУТНИКИ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ И ПЛУТОН

Итак, мы познакомились в общих чертах с семейством планет, близких к нашему светилу. Среди другого семейства, расположенного за астероидным поясом, ни одна из четырех больших планет не обладает твердой по-

верхностью в обычно понимаемом значении этого слова, о чем мы уже упоминали выше. Что же касается Плутона, то мы видели, что его никак нельзя относить к большим планетам ни по размерам, ни по ряду других характеристик. Скорее он напоминает крупный астероид (или же систему из двух астероидов), поэтому некоторые исследователи вообще не склонны считать его планетой. Но и само семейство больших планет включает в себя много твердых тел. Это их спутники, охватывающие широкий диапазон размеров — от сопоставимых с планетами земной группы до небольших астероидов (см. табл. 2).

К сожалению, сведения о большинстве этих тел, основанные на наземных наблюдениях, весьма ограничены. Касается это в первую очередь самых внешних спутников Юпитера, Сатурна и Нептуна, обладающих наибольшими наклонениями и эксцентриситетами орбит. Примерно четверть из них обращается вокруг своих планет не в прямом, а в обратном направлении. Уже сам этот факт определенно указывает на то, что эти спутники, вероятно, представляют собой захваченные астероиды, имеющие неправильную форму, и что основные черты их поверхностей не претерпели заметных изменений после захвата (за исключением возможно более интенсивной бомбардировки при нахождении в окрестности крупного гравитирующего тела). В то же время природа других, особенно близких к планете больших спутников, скорее всего является иной, тесно связанной с периодом формирования само́й планеты.

Можно предположить, что при очень низких температурах конденсации во внешних областях Солнечной системы и при сравнительно малых размерах этих тел значительная часть слагающего вещества представляет собой водяной, метановый и аммонийный лед, который во многих случаях должен обнаруживаться на поверхности. Наиболее вероятным кажется наличие водяного льда вследствие его большого содержания в Солнечной системе, а также более высокой стабильности по сравнению с аммонийным и метановым льдом.

Что же наблюдается на самом деле? Водяной лед действительно был обнаружен на трех из четырех галилеевых спутников Юпитера и на шести спутниках Сатурна. Основой для этого вывода послужили спектры отражения галилеевых спутников в сопоставлении со спектром льда из H_2O, которые показали, что характерные при-

знаки ледяного поглощения особенно четко присутствуют в спектрах Европы и Ганимеда, в значительно меньшей степени они проявляются у Каллисто, а у Ио вообще отсутствуют. Это привело к представлениям о существенных различиях поверхностей этих тел и разных путях их тепловой эволюции.

Аналогичная ситуация наблюдается у спутников Сатурна. Покрытые водяным льдом поверхности (а некоторые — возможно и целиком ледяной состав) имеют все спутники внутри орбиты Титана — Янус, Мимас, Энцелад, Тефия, Диона, Рея. На других спутниках Сатурна, а также спутниках Урана и Нептуна, каких-либо свидетельств присутствия водяного или образующегося при еще более низких температурах конденсации аммиачного или метанового льда не найдено. У них низкая отражательная способность, что сближает характеристики их поверхностей. Это спутники Сатурна Гиперион и Феба, спутники Урана Титания и Оберон, спутник Нептуна Тритон. В то же время для спутника Сатурна Япета характерно то, что у него одна сторона (в направлении движения по орбите) светлая, с высокой отражательной способностью, а противоположная сторона темная. Приемлемого объяснения такой асимметрии пока не найдено.

К сожалению, ничего не известно о поверхности самого большого спутника Сатурна — Титана, по размерам превышающего Меркурий. Объясняется это тем, что изучению отражательных свойств его поверхности мешает атмосфера. Предполагали, что поверхность Титана может состоять из водяного или метанового льда. Выдвигалась гипотеза, согласно которой она может быть покрыта густой органической массой. В основе последней лежали результаты лабораторных исследований, показавшие, что в метаново-водородных атмосферах под воздействием ультрафиолетового излучения образуются сложные углеводороды — такие, как этан, этилен и ацетилен. Как здесь не вспомнить существовавшие еще в 50-х годах нашего столетия близкие к этим представления о поверхности Венеры: ведь и на ней предполагалось обилие углеводородов, моря́ нефти и даже пышная растительность. К сожалению, реальность уже не раз опровергала экзотические ожидания; очевидно, не будет исключением и Титан с его недавно открытой холодной азотной атмосферой.

В отличие от спутников планет-гигантов, у Плутона отождествлены спектральные признаки метанового конденсата. По результатам узкополосной фотометрии отношение интенсивности отражения в двух спектральных областях, в одной из которых расположены полосы поглощения водяного и аммиачного льда, а в другой — сильная полоса поглощения метанового льда, оказалось равным 1,6. Если взять чистый метановый лед и снять те же спектры в лаборатории, то отношение оказывается лишь немного больше, в то время как для спутников гигантов с признаками водяного льда на поверхности это отношение существенно меньше единицы. Это является довольно сильным аргументом в пользу наличия метана. Обнаружение метанового льда на Плутоне меняет существовавшие до недавнего времени представления о его поверхности, образованной скальными породами, в сторону более реальных предположений о покрывающем ее протяженном ледяном слое.

ПОВЕРХНОСТИ ГАЛИЛЕЕВЫХ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА И АМАЛЬТЕИ

В самое последнее время, благодаря пролетам около Юпитера космических аппаратов «Вояджер», мы узнали много нового и интересного о галилеевых спутниках Юпитера. Стало, наконец, возможным увидеть их поверхности (рис. 32), узнать, как выглядит ближайший к Юпитеру спутник Амальтея (рис. 33). По своим размерам и расположению галилеевы спутники можно уподобить модели ближайших окрестностей Солнечной системы, где находятся планеты земной группы. Однако эти тела, обладающие уникальными свойствами поверхностей, сильно отличаются от земных планет по целому ряду характеристик.

Наиболее удивительным оказался первый из семейства галилеевых спутников — Ио, на котором обнаружено много действующих вулканов (рис. 34). На протяжении нескольких часов пролета двух аппаратов «Вояджер» наблюдалось несколько извержений с мощными вулканическими выбросами, причем шесть из семи вулканов, зарегистрированных первым аппаратом, продолжали действовать четыре месяца спустя, во время пролета второго аппарата. Крупнейшее извержение со следами вытекающей лавы и вулканических отложений, по форме

напоминающих отпечаток коровьего копыта, видно немного правее и ниже центра на рис. 34. Три крупных извержения отчетливо выделяются на краях диска Ио (рис. 35). Высота мощного выброса справа составляет

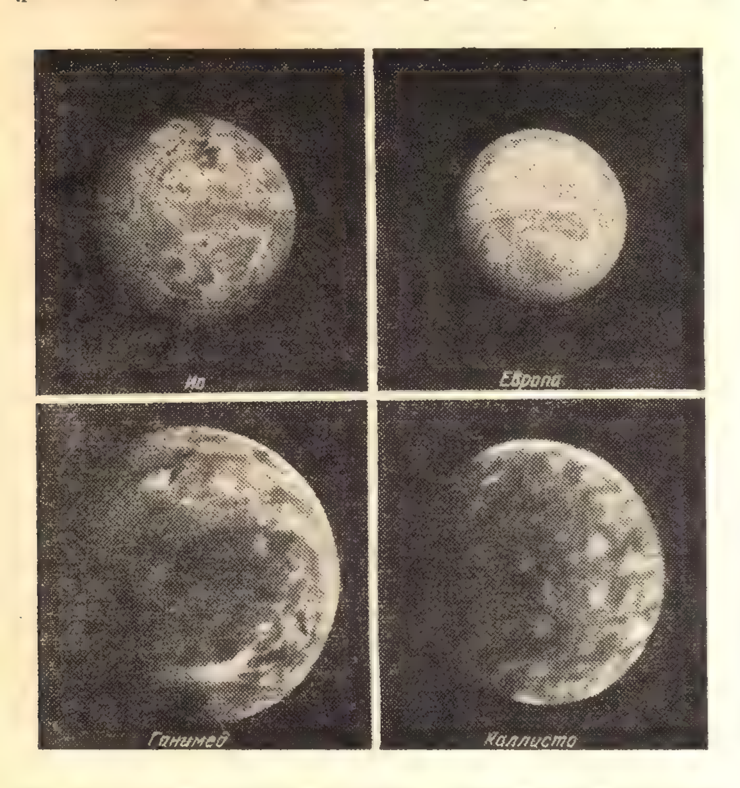


Рис. 32. Галилеевы спутники Юпитера. Максимальными контрастами обладает поверхность Ио, минимальными — Европа. У обоих этих спутников наиболее высокое альбедо. Самый темный объект — Каллисто. Отражательные характеристики определяются различными свойствами поверхностей этих тел, различимыми на этих снимках «Вояджера-1».

почти 200 км, и легко подсчитать, что для этого необходима скорость на выходе из вулканического жерла около 1 км/с! Это во много раз превышает скорость и высоту, достигаемые при извержении вулканов на Земле, хотя при наблюдении из космоса такие события выглядят, пожалуй, не менее впечатляющими, как это показано

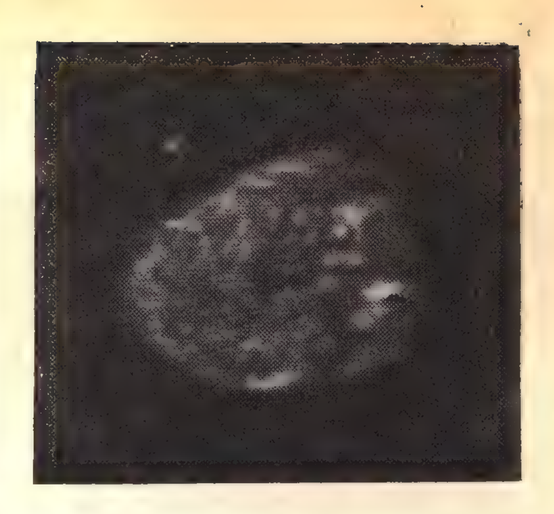


Рис. 33. Спутник Юпитера Амальтея. Размеры 265×150 км. Своей неправильной формой и низкой отражательной способностью напоминает астероид; поверхность кратерированная (снимок «Вояджера-1»).



Рис. 34. Поверхность Ио с характерными следами действующего вулканизма (мозаика из 4-х снимков «Вояджера-1»).

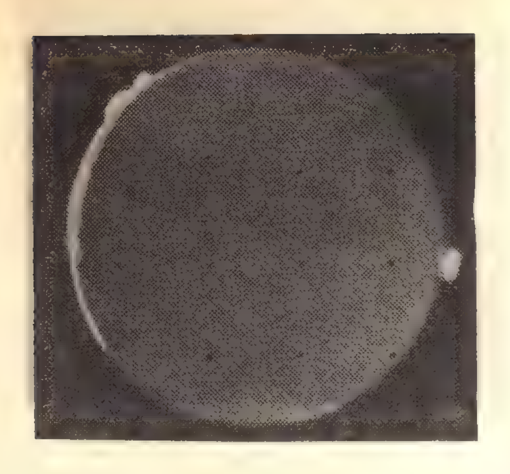




Рис. 35. Вверху — извержения вулканов на Ио; высота выбросов достигает 200 км (снимок «Вояджера-2»). Внизу (для сравнения) — извержение самого крупного вулкана в Европе Этны (о. Сицилия). Снимок сделан со спутника «Тайрос» 4 августа 1979 г. в инфракрасных лучах. Протяженность облака газов и пепла около 200 км, высота выброса около 20 км.

на рис. 35 внизу, на примере извержения вулкана Этна на о. Сицилия. Связано это в первую очередь с тем, что, в отличие от Земли, у Ио очень разреженная атмосфера, поэтому продукты извержения ускоряются за счет расширения газа в вакуум. При этом очаг извержения может быть расположен на очень небольшой глубине.

Что представляют собой продукты извержения, с которыми непосредственно связаны структура и цвет поверхности? Спектры отражения Ио, в которых не обнаруживается признаков воды или водяного льда, содержат вместе с тем четкие признаки серы и ее соединений (это проявляется прежде всего как сильное уменьшение отражения в синем и ультрафиолетовом участках спектра). В пользу серы говорят и эмиссионные спектры, излучаемые веществом в окрестностях орбиты Ио, и естественно предположить, что спутник является источником этого вещества, поставляемого мощными вулканическими выбросами. Хорошо известно, что сера (в виде сернистого ангидрида SO_2 и сероводорода H_2S) является одним из главных продуктов вулканических извержений и у нас на Земле. С учетом этих и ряда других соображений все исследователи сходятся в мнении о том, что именно сера играла и продолжает играть определяющую роль в геологии Ио и эволюции поверхности этого спутника.

Большое количество серы могло накопиться за геологическую эпоху в поверхностном слое, поверх силикатной коры. Толщина этого слоя оценивается от 3—4 до 20—30 км. Поднимаясь из глубины, жидкая магма из-за большей, чем у серы, плотности вряд ли достигает поверхности (подобно большинству извержений подводных вулканов на Земле), а взаимодействуя с отложениями серы и сернистого ангидрида, приводит к их испарению. Расширяющийся газ вырывается в космос, увлекая за собой потоки жидкой серы. При охлаждении сера и сернистый ангидрид конденсируются на поверхности, создавая яркую окраску: красный и красновато-желтый цвета принадлежат сере (в частности, ее пурпурной модификации S_2, образующейся при замораживании сильно нагретых паров серы), белые пятна — это снег из сернистого ангидрида, а черные пятна — вулканический пепел. В более глубоких слоях могут отлагаться соединения типа сульфидов магматогенного происхождения.

Независимо от того, насколько реалистична такая модель, одно остается бесспорным: среди объектов Солнечной системы (по крайней мере тех, поверхности которых нам уже удалось увидеть) Ио оказался рекордсменом по вулканической активности, что еще год назад вряд ли кто-нибудь мог предположить. Это пока единственный (кроме, конечно, нашей Земли) пример широко развитого современного вулканизма, к тому же, вероятно, продолжающегося непрерывно и превосходящего по своей интенсивности вулканическую деятельность на Земле.

Мы говорили о поражающих воображение нескольких грандиозных вулканах на Марсе, Венере. Но на маленьком по сравнению с земными планетами Ио (по своим размерам он почти такой же, как Луна) обнаружено свыше ста вулканических кальдер, поперечником до 200 и более километров, т. е. в 10—100 раз превосходящих земные! Вокруг многих видны потоки вытекающей или застывшей лавы, протяженностью в несколько сот километров и толщиной в десятки километров, что также во много раз превосходит привычные земные масштабы. Правда, сами вулканы сравнительно невысокие, больших перепадов высот на поверхности Ио, где преобладают межвулканические равнины, нет. Только в полярных областях встречаются отдельные горы высотой до 10 км. В целом же рельеф сглаженный, и одновременно не обнаруживается выходов скальных пород. Все это казалось бы благоприятствует гипотезе, согласно которой у Ио очень тонкий верхний слой затвердевшей коры, под которой находится расплавленная сера.

Вместе с тем встречающиеся на межвулканических равнинах отдельные холмы заметной величины и глубокие впадины нельзя объяснить в рамках такой модели по условиям изостазии. Поэтому скорее следует говорить об отдельных областях расплава, подповерхностных «серных морях», с температурой не ниже +110°С, при которой сера плавится. Сама же температура поверхности в районе экватора составляет —140°С, а в полярных областях еще градусов на 50 ниже. Лишь в локальных участках, ассоциируемых с вулканической деятельностью, обнаружена температура +10°С, т. е. на 150° выше средней поверхностной температуры. При столь низкой температуре пары серы, вырываясь на поверхность, очень быстро охлаждаются, что и объясняет образование ее красной модификации в вулканических отложениях, помимо

двух наиболее распространенных в земных условиях аллотропических модификаций лимонно-желтого и медово-желтого цвета.

Наличие вулканической активности и отсутствие на поверхности ударных кратеров крупнее 1—2 км свидетельствует о том, что поверхность Ио очень молодая, ее

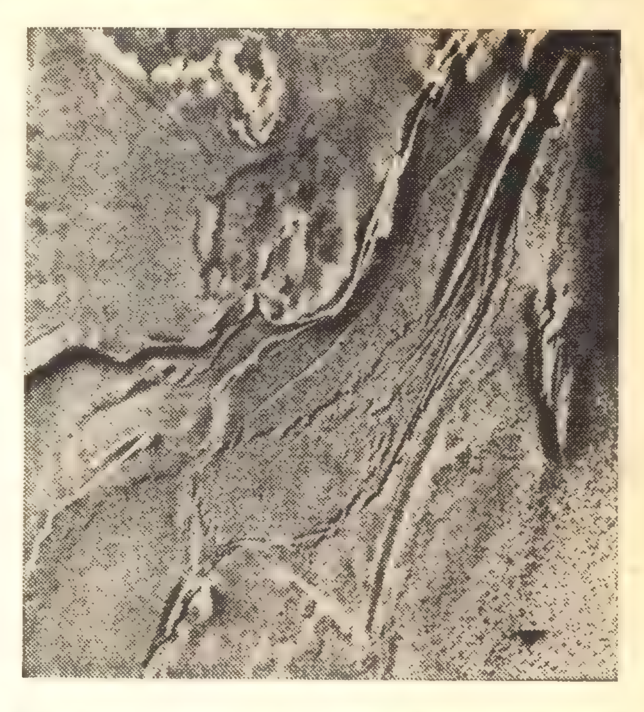


Рис. 36. Участок поверхности Ио вблизи южного полюса. Видна широкая долина, с крутыми откосами; внутри ее система экскарпов и ущелий (снимок «Вояджера-1»).

возраст очевидно не превышает миллиона лет. На рис. 36 показан участок поверхности вблизи южного полюса, на котором хорошо видны отдельные расщелины и сбросы (в верхней правой части и справа у терминатора), а также несколько равнинных областей, расположенных на разных уровнях, с наиболее возвышенной частью в левом верхнем углу. Равнинные области отделены друг от друга эскарпами, возможно образовавшимися в про-

цессе остывания лавы (в том числе подповерхностного расплава серы) и последующей эрозии. Эти, а также полярные районы с тектоническими трещинами и грабенами, очевидно, представляют собой относительно старые участки коры, в наименьшей степени модифицированные современным вулканизмом. Тем не менее и они содержат указания на его определяющую роль в эволюции поверхности в глобальном масштабе и одновременно свидетельствуют о слабой степени эрозии, что служит

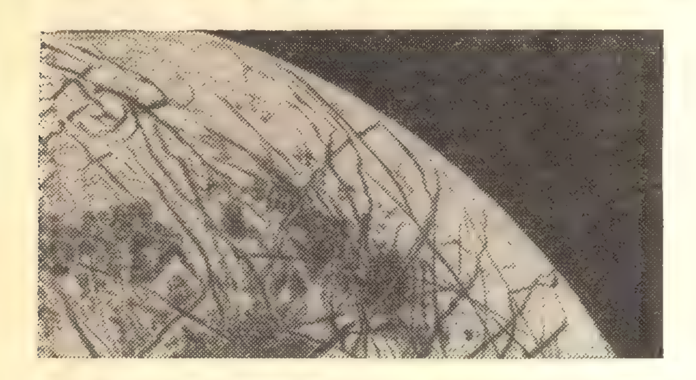


Рис. 37. Фрагмент поверхности Европы с системой трещин, образующихся в ледяной коре, вероятно, вследствие тектонических процессов. Длина трещин — несколько тысяч километров, ширина свыше 100 км. На поверхности отсутствуют кратеры (снимок «Вояджера-2»).

дополнительным подтверждением предела ранее сделанной возрастной оценки.

Другие галилеевы спутники не проявляют столь бурной, как Ио, геологической активности. Однако поверхность каждого из них является по-своему феноменальной, обладающей каким-либо уникальным свойством. Известная наибольшей отражательной способностью Европа оказалась небесным телом с поразительно гладкой поверхностью, самой гладкой из известных в Солнечной системе. Максимальные вариации рельефа оцениваются не в километры, а в десятки метров — и это в глобальном масштабе, для тела, диаметр которого всего лишь на 350 км меньше, чем у Луны! Именно такую высоту (порядка 50 м) имеют различающиеся на поверхности цепи холмиков и пригорков, в то время как отдельные детали рельефа на поверхностях Ганимеда и Каллисто

достигают по крайней мере в десять раз большей высоты. Совершенно не видно на поверхности Европы кратеров, во всяком случае кратеров крупнее 5 км в диаметре, что приводит к представлениям о ее сравнительно недавнем формировании, или о периодически происходящих процессах «обновления». Еще одним феноменом этого спутника оказалось наличие большого количества линейчатых структур, пересекающихся под разными углами полос, буквально изрезавших его поверхность и протянувшихся в разных направлениях на сотни и тысячи километров, иногда охватывая половину окружности (около 5000 км). Ширина этих полос в среднем несколько десятков километров, но местами доходит до 200—300 км, а глубина обычно не превышает нескольких сотен метров (рис. 37).

Что обусловило их образование? Чтобы это понять, прежде всего напомним, что из анализа спектров отражения галилеевых спутников было высказано предположение о наличии на поверхности Европы и Ганимеда водяного льда. Измерения с космических аппаратов подтвердили правильность этого предположения. Была также определена поверхностная температура, которая в районе терминатора составила —180° С и всего на 30—40° больше в полдень. При такой температуре поверхность, конечно, является полностью замерзшей. Объяснение удивительной гладкости поверхности Европы и обилия нитевидных полос можно найти в рамках модели, согласно которой слой льда простирается на довольно большую глубину. Однако, подобно ситуации, которую мы подробно рассматривали, рассказывая о слое вечной мерзлоты и покрытых льдом реках на Марсе, твердая ледяная корка, очевидно, лежит только на самой поверхности, которая покоится на гораздо более протяженном слое, состоящем из смеси сравнительно рыхлого «губчатого» льда с водой. Такая смесь, называемая шугой, хорошо известна у нас на Земле. Она образуется перед началом ледостава за счет переохлаждения воды на горных и порожистых реках, а также в нижних бьефах гидроузлов, забивая водозаборники, фильтры и препятствуя их нормальной работе.

Оба слоя — шуга и ледяной покров — составляют своеобразную верхнюю оболочку Европы, максимальная толщина которой оценивается примерно в 100 км. Предполагают, что ее частично расплавленное состояние обус-

ловлено механизмом генерации внутреннего тепла. Под шугой возможно скрыты значительные вариации высот на поверхности твердого силикатного вещества, подобно тому как земные океаны полностью нивелируют рельеф дна. Только на Европе шугу скорее следует уподобить собственно коре, а не гидросфере.

Нитевидные полосы на поверхности — это не что иное, как трещины в верхнем отвердевшем слое льда, возникающие под действием внутренних напряжений, создаваемых расширением и сжатием шуги. При образовании трещин может происходить оседание льда, его смещения, поднятие шуги на поверхность и ее замерзание. Заполнение трещин свежим рыхлым (а значит, и менее плотным) льдом легко объясняет возникновение белых полос на фоне грязноватой поверхности льда, а темные полосы, возмо́жно, образуются там, где вместе со льдом на поверхность выходит темное вещество с большей глубины. Сопровождающие эти процессы смещения крупных массивов льда типа движений ледников (глетчеров) должны приводить к стиранию неоднородностей рельефа поверхности, в частности к исчезновению больших кратеров ударного происхождения, что и объясняет факт их отсутствия. Видимо, временна́я шкала этих процессов составляет от единиц до нескольких десятков миллионов лет, если принять во внимание число сохранившихся на отдельных участках поверхности кратеров небольших размеров.

Еще старше поверхность Ганимеда, наибольшего среди галилеевых спутников, превышающего по своим размерам почти на 500 км Меркурий. Внешне этот спутник больше всего похож на Луну (см. рис. 32), однако при наблюдении с близкого расстояния обнаруживаются очень большие отличия. Самым примечательным свойством его поверхности оказалось наличие многочисленных ветвящихся «пучков» длинных параллельных борозд (желобов) и вытянутых хребтов, сосредоточенных в светлых областях. С ними соседствует много темных областей, сильно изрытых кратерами, сравнительно неглубокими, диаметром от единиц до нескольких десятков километров. В то же время на поверхности светлых областей кратеров значительно меньше (хотя и больше, чем, например, на лунных морях). Особенно выделяется крупная темная область на противоположной к Юпитеру стороне Ганимеда, протяженностью свыше 3000 км. Она

вероятно представляет собой пример наиболее древней коры, не закрытой более поздними отложениями, как это случилось со светлыми областями. В некоторых темных областях угадываются остатки старых больших котловин. С образованием одной из громадных древних котловин связаны хорошо различимые расходящиеся концентрические кольца, возникшие при ударе.

Аналогичные кольцевые структуры еще более отчетливо видны в нескольких местах на Каллисто, поверхность которого во многом похожа на поверхность Ганимеда в темных областях. Такие области можно рассматривать как своего рода «окна» в самый ранний период эволюции галилеевых спутников. Обусловлено это тем, что степень их насыщенности кратерами поперечником в несколько десятков километров примерно аналогична степени насыщенности, наблюдаемой на древних плоскогорьях земной группы планет и Луны. Формирование же этих плоскогорий относят, как мы видели, к завершающему периоду интенсивной бомбардировки планет около 4 млрд. лет назад. Конечно, следует оговориться, что такое сопоставление допустимо при условии примерно одинакового хода этих процессов во внутренних и внешних областях Солнечной системы.

Морфология «пучков» параллельных борозд в светлых областях Ганимеда хорошо различима на фотоснимках (рис. 38), особенно в области, примыкающей к терминатору, снятой с высоким разрешением (рис. 39). Ширина этих «пучков» достигает нескольких сотен, а длина — нескольких тысяч километров, отдельные борозды имеют ширину от 5 до 15 км и глубину несколько сотен метров (последнее определено по величине отбрасываемой тени у терминатора). В областях наибольшего сосредоточения они разделяют всю поверхность на отдельные многоугольники размером в несколько сотен километров. Высказываются предположения, что такие ландшафты запечатлели период наибольшей геологической активности этого спутника, когда кора была особенно подвижной и происходили тектонические процессы, в чем-то напоминавшие перемещения и деформации материковых платформ на Земле. При этом образовались складки за счет горизонтальных сдвигов, с относительными смещениями и перпендикулярными ответвлениями, как это хорошо видно, например, в верхней части рис. 38, а также отдельные хребты, «выжатые» из возникавших трещин, в



Рис. 38. Фрагмент поверхности Ганимеда с системой многочисленных желобов, разделяющих кратерированную поверхность на отдельные участки протяженностью от нескольких сотен до 1000 км (снимок «Вояджера-1»).



Рис. 39. Крупномасштабное изображение желобов на поверхности Ганимеда. Эти линейные структуры, очевидно, образовались в его ранней истории вследствие тектонических процессов, следы которых сохранились на ледяной коре (снимок «Вояджера-1»).

коре. Эти образования моложе темных областей, о чем опять же можно судить по числу кратеров, плотность которых на этих участках поверхности приблизительно на порядок меньше. По своему возрасту они, вероятно, соответствуют морским районам на Луне.

Подобно Европе, поверхность Ганимеда покрыта льдом. Помимо сравнительно высокого альбедо и спектров отражения в ближней инфракрасной области, убеди-



Рис. 40. Фрагмент поверхности Ганимеда со «звездами» льда вокруг кратеров ударного происхождения; «звезды» свидетельствуют о ледяной коре спутника (снимок «Вояджера-1»).

тельным свидетельством существования поверхностного льда служат кратеры, образующиеся при ударе метеоритов. Примеры таких кратеров видны на фотоснимке участка поверхности Ганимеда (рис. 40). В отличие от лунных или марсианских, у них вогнутое дно, образующееся при быстром замерзании текучего, а не сыпучего материала. Крупный кратер в верхней части снимка имеет диаметр около 150 км, очень хорошо видна лучевая структура, наслоения выброшенного льда вокруг кратера, выбросы и обнажения «свежего» льда вдоль лучей.

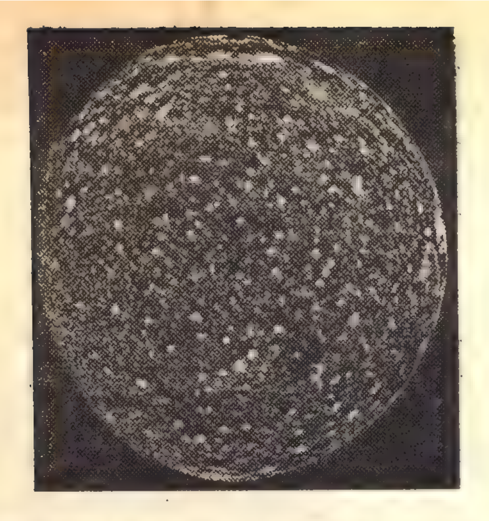


Рис. 41. Предельная насыщенность кратерами поверхности Каллисто. Изображение составлено мозаикой снимков, переданных «Вояджером-2». У многих кратеров сохранились лучевые структуры.



Рис. 42. Фрагмент поверхности Каллисто с разрешением около 7 км. Справа — котловина (подобная видимой на рис. 41 вверху, справа) поперечником 600 км, с системой концентрических колец, внешнее из которых достигает 2600 км в диаметре. Они образовались при ударе метеорита одновременно с самой котловиной и представляют собой обнажения льда. Это образование получило название «бычий глаз» (снимок «Вояджера-1»).

Отсутствие значительных вариаций высоты на поверхности (свыше 1 км) также благоприятствует представлению о ледяной поверхности этого спутника Юпитера.

Самым старшим в семействе, обладающим наибольшей степенью насыщенности ударными кратерами не только среди галилеевых спутников, но вообще среди известных нам небесных тел, оказался спутник Каллисто (см. рис. 32). Плотность кратеров на Каллисто, лишь немного уступающем Ганимеду по своим размерам, видимо, достигла максимально возможной величины, о чем можно судить по мозаичному изображению его диска, составленному из девяти фотоснимков, переданных «Вояджером-2» (рис. 41). Число только крупных кратеров достигает нескольких сотен, вокруг нескольких из них наблюдаются яркие лучи.

Два наиболее светлых участка в целом довольно темной поверхности Каллисто — это громадные котловины типа лунных морей, с концентрическими кольцами, получившие название «бычий глаз». Размер наибольшей котловины на рис. 42 превышает 600 км, число колец не менее 15, а диаметр самого внешнего кольца около 2600 км. Эти образования также изрыты кратерами, однако плотность их убывает к центру котловины.

Фактура поверхности у левого края снимка образована огромным числом буквально примыкающих друг к другу кратеров, а по направлению к правому краю значительная часть кратеров была разрушена смещением и напластованием поверхностного материала при образовании котловины. Вместе с тем при этом не осталось сколь-нибудь заметного углубления на месте самой котловины, а также валов и хребтов на ее периферии, подобных тем, которые образовались на поверхностях Луны, Меркурия, Марса. Вместо них сохранились концентрические кольца, представляющие собой следы ударных волн, возникших при падении крупного метеорита.

Подобные конфигурации не сохранились на небесных телах с силикатной корой. Эти обстоятельства явно указывают на то, что поверхность Каллисто сложена легкоплавким веществом, быстро заполнившим углубление и «заморозившим» процесс распространения колебаний. Да и в целом поверхность Каллисто достаточно гладкая,

глубина кратеров небольшая. Все это позволяет предположить, что верхний слой Каллисто, подобно Ганимеду и Европе, также сложен в основном льдом. Слабые признаки ледяного поглощения в спектрах Каллисто, как и очень низкое альбедо этого спутника (лишь вдвое большее, чем у Луны), можно объяснить тем, что поверхность слагает «грязный» лед, возможно, с примесями силикатного вещества, и к тому же покрытый слоем метеорной пыли. В конечном счете первопричиной всего этого, очевидно, является отсутствие активных эндогенных процессов, что сохранило поверхность Каллисто по существу в «первозданном» виде, с момента завершения заключительного этапа интенсивной бомбардировки около 4 млрд. лет назад, за исключением котловин, образовавшихся позднее.

Ближайшим собратом Каллисто с этой точки зрения является Амальтея, названная так по имени нимфы, вскормившей Юпитера. Открытая в 1892 году американским астрономом Эдуардом Барнардом и ставшая пятым спутником Юпитера она выглядит как астероид с размерами 265×150 километров (см. рис. 33), что почти на порядок превышает размеры Фобоса. Однако по сравнению с галилеевыми спутниками это тело очень маленькое, хотя оно и оказалось примерно втрое больше, чем предполагали по наземным наблюдениям. Объясняется это тем, что Амальтея, обращающаяся по орбите на среднем расстоянии менее 200 тыс. км от яркого диска Юпитера, представляет для астрономов чрезвычайно трудную задачу. Ее поверхность преимущественно красного и частично черного цвета, в целом очень темная (альбедо от 4 до 6%), сильно кратерированная. Ни по цвету, ни по отражательной способности она не похожа на поверхности галилеевых спутников. Интересно, что Амальтея в сильной степени испытывает на себе воздействие мощной магнитосферы Юпитера. Это проявляется в том, что ее поверхность неожиданно оказалась теплее, чем предполагали, исходя из расчетов радиационного баланса. Таким дополнительным источником ее нагрева могут служить энергичные заряженные частицы и выделение джоулева тепла. Вряд ли приходится сомневаться в том, что, подобно спутникам Марса, это тело представляет собой захваченный астероид либо (что также вероятно) реликт стадии формирования системы Юпитера.

КОЛЬЦА ПЛАНЕТ

К характерным реликтам стадии формирования в семействе спутников относятся кольца планет, которые обнаружены к настоящему времени у всех планет-гигантов, кроме Нептуна. Однако открытие знаменитых колец Сатурна Г. Галилеем в 1610 г. и колец Юпитера и Урана уже в наши дни разделяет период свыше 350 лет. К тому же следует вспомнить, что Галилей думал, что наблюдает спутники планеты, и лишь крупнейший нидерландский физик Х. Гюйгенс описал их 60 лет спустя как кольца. Прошло еще около 200 лет, прежде чем в результате независимых теоретических исследований выдающихся ученых XIX столетия английского физика Дж. Максвелла и русского математика С. В. Ковалевской было доказано, что это не сплошные твёрдые или жидкие образования вокруг планеты, а совокупность отдельных небольших тел или частиц. Иначе они были бы разрушены гравитационными возмущениями, поскольку сплошное образование противоречит условию устойчивости кольца на относительно небольшом расстоянии от планеты. Этот вывод был вскоре экспериментально подтвержден замечательным русским астрономом А. А. Белопольским, а также независимо проводившимися наблюдениями на американских и французских обсерваториях. Было обнаружено, что внутренние части кольца обладают большей скоростью вращения, чем внешние, что соответствует требуемому различию в значениях первой космической (круговой) скорости, которая обратно пропорциональна $r^{1/2}$, где r — расстояние спутника от планеты.

Кольцо Юпитера было открыто в 1979 г. при пролете «Вояджеров» (рис. 43). Скорее, правда, надо сказать не открыто, а подтверждено, поскольку предположение о его существовании было высказано в 1960 г. советским астрономом С. К. Всехсвятским, а в 1976 г. на такую возможность более определенно указали американские физики М. Экуна и Н. Несс, которые проанализировали характер распределения вблизи Юпитера заряженных частиц, измерявшихся космическим аппаратом «Пионер-11». Как и все его спутники, кольцо Юпитера расположено в экваториальной плоскости на расстоянии 55 000 км от видимой верхней границы облаков, что составляет более 2,3 радиуса планеты и примерно втрое ближе расстояния до Амальтеи. Ширина кольца 6000 км, а толщи-

на около 1 км. К тому же оно образовано очень темными частицами, поэтому его блеск на 11 звездных величин (т. е. более чем в 10 тысяч раз) слабее по сравнению, например, с кольцами Сатурна. Естественно, его исключительно трудно наблюдать с Земли, и лишь вскоре после открытия это удалось сделать астрономам обсерватории

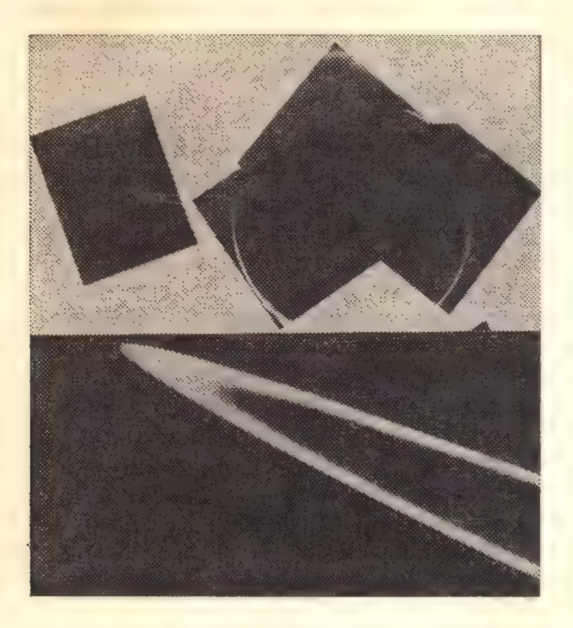


Рис. 43. Изображение кольца Юпитера, полученное «Вояджером-2». Вверху — светлый лимб Юпитера с кольцом. Внизу — кольцо в крупном масштабе. Ширина кольца 6000 км, толщина около 1 км, расстояние его внешнего края от верхней границы юпитерских облаков 55000 км.

Мауна Ки, использовавшим телескоп с зеркалом диаметром 224 см и чувствительный приемник излучения в ближней инфракрасной области спектра (на длине волны 2,2 мкм).

Природа частиц кольца неизвестна, однако можно предполагать, что по своему составу они не сильно отличаются от вещества, слагающего Амальтею. Размеры частиц оцениваются в пределах от нескольких микрон до нескольких метров. На присутствие мелких частиц определенно указывает, в частности, наибольшая яр-

кость кольца при наблюдении со стороны затмения Юпитером Солнца,— как раз при таком расположении получены изображения на рис. 43. Дело в том, что при освещении мелких частиц максимальная яркость создается в направлении, противоположном направлению на источник (говорят, что индикатриса рассеяния имеет сильно вытянутый вперед «нос»). Это и объясняет столь четкое выделение кольца на темном фоне космоса.

По-видимому, кольцо представляет собой несформировавшийся спутник на ближайшем расстоянии от Юпитера, находящийся внутри так называемого предела Роша $A=2{,}4\ R$ — критического расстояния от планеты радиуса R, в пределах которого вследствие разрушающего действия приливных сил существование спутника теоретически невозможно. Если бы такой спутник образовался, то по своим размерам он оказался бы приблизительно вдвое больше Амальтеи, как показали оценки общего содержания частиц в кольце. Предел Роша установлен для жидких спутников, поэтому такому ограничению не противоречит обнаружение 14-го спутника Юпитера поперечником 30—40 км, представляющего собой астероидоподобное тело, орбита которого лежит у внешнего края кольца, т. е. на расстоянии 1,8 R. Как показал еще в 40-х годах нашего столетия известный английский астроном и геофизик Гарольд Джеффрис, необходимые для разрушения твердого спутника внутренние напряжения могут возникнуть лишь при достаточно больших его размерах. Например, катастрофическим оказалось бы сильное сближение с Юпитером тела диаметром свыше 500 км.

В отличие от кольца Юпитера, знаменитые кольца Сатурна хорошо наблюдаются с Земли благодаря тому, что образующие их частицы обладают высоким альбедо в видимой области спектра, а сами кольца значительно более протяженные. Угол между плоскостью колец и направлением на Землю изменяется в пределах от 0° до 28°, и земной наблюдатель поэтому видит их под разными углами. Одновременно с этим меняется и блеск Сатурна. Выделяются три основных кольца (рис. 44): А (внешнее), В (среднее) и С (внутреннее). Среди них самое яркое кольцо В, а кольцо С очень слабое, трудно наблюдаемое; из-за низкой яркости его иногда называют креповым. Сообщалось также о существовании еще двух очень слабых колец: одного внутри кольца С и другого — за кольцом А, которым Международный астрономический

союз присвоил обозначения соответственно D и E. Кольцо D не обнаружено при пролете около Сатурна «Пионера-11» (на пределе плотности, соответствующей оптической толще 0,003), но те же измерения подтвердили наличие повышенной плотности частиц за пределами кольца A; ближайшая зона названа кольцом F (рис. 45 и 46).

Все кольца находятся внутри предела Роша, самая внешняя граница лежит на расстоянии около 2,3 *R*. Ширина колец A и C составляет около 17 000 км, кольца B — около 28 000 км, а толщина их не превышает 1—2 км

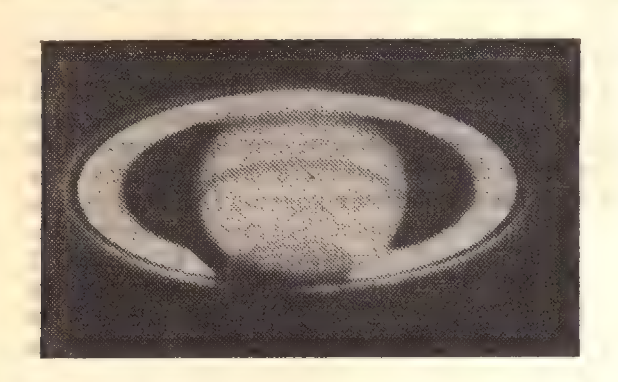


Рис. 44. Фотография Сатурна с Земли, полученная на обсерватории Каталина Аризонского университета.

(измерения на «Пионере-11» дали значение толщины 1,3 км.) Между кольцами выделяются промежутки, главный из которых шириной около 5000 км, между A и B, называют делением Кассини, а между B и C деление нечеткое. Иногда выделяют также широкую зону пониженной яркости у середины кольца A как деление Энке. Существование делений объясняется резонансными возмущениями орбит частиц спутниками Сатурна, на что впервые обратил внимание в 1884 году Кирквуд, по имени которого, напомним, названы и минимумы в концентрическом распределении плотности астероидов в астероидном поясе (люки Кирквуда). Механизм и в том и другом случае примерно аналогичный. В случае колец Сатурна период обращения частицы внутри каждого из делений строго соотносится (в отношении 1/2, 1/3 и т. д.) с сидерическим периодом одного или нескольких спутни-

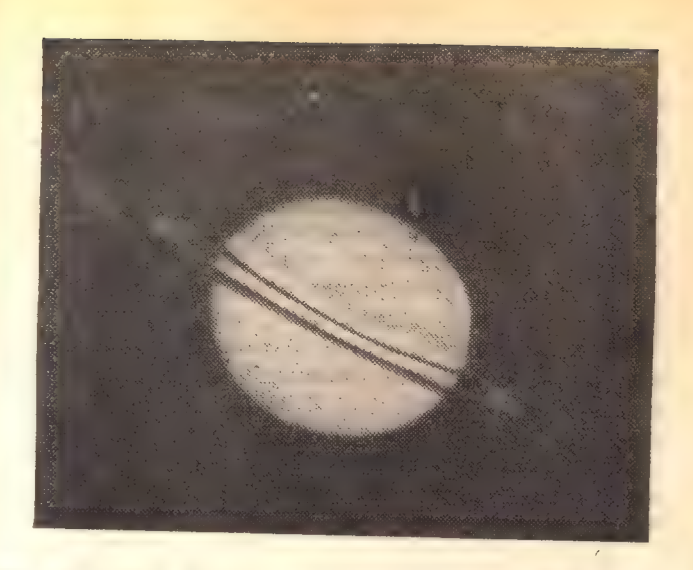


Рис. 45. Снимок Сатурна, полученный аппаратом «Пионер-11» с расстояния 2,8 млн. км. Видны детали системы колец и деление Кассини. Пятнышко над Сатурном — его спутник Титан диаметром 5120 км.

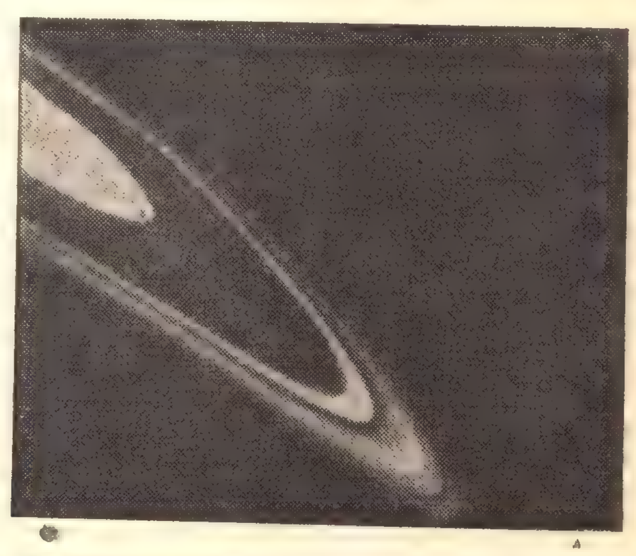


Рис. 46. Наиболее крупномасштабное изображение колец Сатурна, полученное «Пионером-11».

ков планеты. Теоретический анализ показывает, что определяющую роль здесь играет орбитальный резонанс со спутником Сатурна Мимасом.

По результатам наземной спектрофотометрии в ближней инфракрасной области спектра были получены довольно убедительные свидетельства того, что частицы колец в основном состоят из водяного, а не аммонийного (как раньше предполагалось) льда. Это особенно отчетливо выявилось по результатам отождествления с лабораторными спектрами данных измерений на длине волны 2,25 мкм. Исследования вариаций яркости в зависимости от фазового угла привели к выводу о наличии как очень мелких пылевых частиц, так и частиц с эффективными размерами от единиц до десятков сантиметров. По своим оптическим свойствам эти частицы отличаются от частиц кольца Юпитера, рассеивая падающий на них свет преимущественно назад, или, как говорят, в заднюю полусферу. В свою очередь результаты радиолокационных измерений были интерпретированы, исходя из модели более крупных частиц, имеющих размеры до 10 и более метров.

Исследования с борта «Пионера-11» по существу подтвердили наличие всех этих популяций. Оказалось, что наиболее яркое кольцо B представляет собой монослой глыб размером порядка 15 метров, который «погружен» в более толстый слой частиц размером около 10 см. В то же время в рассеянии света наиболее эффективна фракция мелких частиц, очевидно, образующихся в результате столкновения и дробления крупных глыб. Эти процессы должны компенсировать выметание пыли вследствие радиационного торможения, обусловленного эффектом Пойнтинга — Робертсона. Соотношение популяций и их плотность в кольцах различна, и это объясняет большие различия в оптической толщине.

Значительно более полную информацию о сложной структуре колец принес пролет на расстоянии около 185 тыс. км от центра Сатурна космического аппарата «Вояджер-1» в ноябре 1980 г. Оказалось, что каждое из основных колец состоит из сотен отдельных кольцевых структур, образованных частицами, движущимися по своим орбитам. Некоторые из этих орбит заметно отличаются от круговых. Это, по-видимому, объясняется тем, что сильнее, чем предполагалось, проявляются резонансные явления из-за взаимодействия час-

тиц не только с крупными, но и со сравнительно небольшими спутниками планеты, диаметром в десятки километров, находящимися вблизи колец. Еще четыре новых спутника было недавно открыто «Вояджером» дополнительно к 11, приведенным в табл. 2. Труднее объяснить природу обнаруженных темных радиальных полос в пределах кольца В (а возможно, и А); об их существовании некоторые астрономы упоминали еще в прошлом веке, однако эти наблюдения казались неубедительными, не укладывающимися в привычные представления. Скорее всего, подобные эффекты связаны с динамическими и электростатическими взаимодействиями внутри колец. Возможно, определенную роль здесь играют и различия в составе частиц. До сих пор не все данные наблюдений удается согласовать в рамках ледяной модели; наряду со льдом предполагается существование металлических частиц примерно сантиметрового диапазона. Интересно, что заметное рассеяние, свидетельствующее о повышенной плотности вещества, обнаружено «Пионером-11» и «Вояджером» в области деления Кассини. Полагают, что здесь присутствует небольшое количество рыхлых частиц размером в десятки сантиметров типа грязного снега или клатратов метана и аммиака; возможно, что такие же частицы входят в состав и самих колец.

Большим событием стало открытие в 1976 году по изменению яркости при покрытии Ураном слабой звезды наличия колец и у этой планеты.

Подобно кольцу Юпитера, отражательная способность колец Урана очень слабая (альбедо менее 5%); поэтому, чтобы их наблюдать, требуются совершенные астрономические инструменты и высокое мастерство. Выделяется 5 колец, получивших обозначения α, β, γ, δ и ε, считая в направлении удаления от центра планеты, так что кольцо ε — самое внешнее. Радиус его наружной границы составляет около 2,2 R, что, как видим, опять же удовлетворяет ограничению, накладываемому пределом Роша.

Интереснейшим свойством колец Урана оказалось то, что их ширина возможно переменна, т. е. у них есть заметный эксцентриситет. Из математического анализа с применением уравнений софокусных эллипсов следует, что в случае компланарных орбит величина эксцентриситета кольца ε может достигать 0,13, а если орбиты не-

компланарны, то по крайней мере в одной точке ширина кольца может обращаться в нуль. Но если это условие действительно имеет место, то из-за столкновений частиц кольцо в нулевой точке должно быстро расширяться. К сожалению, имеющиеся экспериментальные данные не позволяют пока однозначно установить реальность этого эффекта; тем не менее теоретически широкая изменчивость кольцевых форм возможна. Точно также очень мало пока известно и о природе частиц колец. Можно лишь утверждать, что образующие их темные частицы определенно не являются ледяными, а скорее похожи на непокрытые льдом поверхности самых больших спутников Урана — Титании и Оберона.

Лошадь
сказала,
взглянув на верблюда:
«Какая гигантская
лошадь — ублюдок».
Верблюд же вскричал:
«Да лошадь разве ты?!
Ты просто-напросто —
верблюд недоразвитый».

В. Маяковский,
«Стихи о разнице вкусов».

Глава IV. ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ И ТЕПЛОВАЯ ИСТОРИЯ

Формирование современного облика планет и спутников было непосредственно связано с процессами, происходившими в их недрах, и в конечном итоге определялось некоторыми общими закономерностями и этапами химической эволюции планетного вещества. В настоящее время затруднительно дать однозначные ответы на вопросы о том, какова была последовательность этих этапов. Вместе с тем уже накопленные экспериментальные данные и удовлетворяющие им теоретические модели позволяют выдвинуть ряд обоснованных предположений относительно геологического настоящего и прошлого планет, понять особенности их внутреннего строения.

Рассмотрение структуры и состава планет-гигантов приближает нас к начальному этапу формирования Солнечной системы около 4,6 млрд. лет назад. Мы исходим из основополагающих представлений о том, что первичный состав вещества протопланетной туманности был одинаков во всей занимаемой ею области и соответствовал солнечному, или космической распространенности элементов. Известно, что в распространенности элементов, за небольшим исключением, наблюдается вполне определенная закономерность: с увеличением атомного порядкового номера она экспоненциально уменьшается (до $z=40$), а для более тяжелых элементов величина распространенности сохраняется почти постоянной.

В состав вещества Солнца, планет и метеоритов вошли основные группы элементов, образовавшихся, согласно современным представлениям, в галактическом

ядерном синтезе (нуклеосинтезе) не менее 10 млрд. лет назад. С возможностью нуклеосинтеза сейчас связываются также процессы, происходящие в центральных областях взрыва при вспышках сверхновых звезд и при выбросах вещества из неравновесного слоя нейтронных звезд или их разрушении в тесных двойных системах. При этом образование элементов тяжелее железа происходит в результате захвата нейтронов и последующих β-распадов. Соответствующие представления развиваются советскими астрофизиками школы Я. Б. Зельдовича.

В процессе образования Солнечной системы возможно продолжался естественный синтез некоторых радиоактивных и стабильных химических элементов, пути эволюции которых отражены в распространенности и соотношениях изотопов. На рис. 47 приведен график, отвечающий химическому составу Солнца, согласно опубликованным в 1976 г. результатам исследований американских космохимиков Д. Росса и Л. Аллера, уточнивших более ранние сводки относительной распространенности элементов, в частности широко использовавшиеся результаты Г. Зюсса и Г. Юри, полученные в 1956 г. Нетрудно убедиться в том, что при описании химического состава Вселенной наиболее важны около десятка элементов, среди которых преобладающую роль играют водород и гелий. Вместе с неоном они образуют наиболее летучую группу веществ (газовую компоненту). Менее летучими являются вода, аммиак и метан, которые относят к ледяной компоненте, а нелетучие вещества (металлы, кремний и их окислы) образуют тяжелую (или, как ее еще называют, «скальную») компоненту, входящую в состав горных пород.

Водород и гелий служили основным «строительным материалом» нашей Солнечной системы, первоначально представлявшей собой, как говорилось, вращающийся газово-пылевой диск, из которого выделился центральный фрагмент — Солнце. Пылевую составляющую этого диска образовывали тяжелая и ледяная компоненты. В дальнейшем тяжелая фракция элементов солнечного состава сохранилась в виде планет земной группы после потери этими планетами летучих и в виде более крупных ядер планет-гигантов, окруженных ледяными мантиями и удержанными ими массивными водородногелиевыми оболочками. При этом относительное содержание тяжелой и ледяной компонент, очевидно, не превышало по

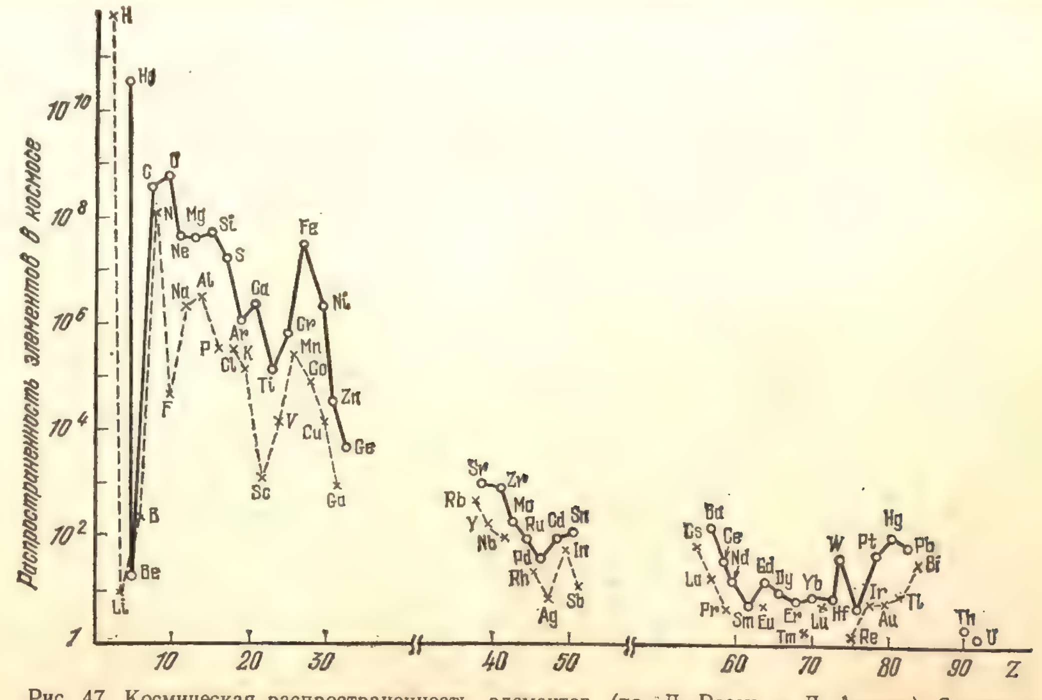


Рис. 47. Космическая распространенность элементов (по Д. Россу и Л. Аллеру). Сплошная кривая выделяет элементы с четным атомным номером Z, прерывистая — с нечетным.

массе нескольких процентов во всей области формирования планет.

По существующим оценкам, для того чтобы весь водород диссипировал с Юпитера или Сатурна, потребовалось бы время, значительно превышающее возраст Солнечной системы. На Уране и Нептуне, при более слабом удержании летучих за счет меньшей массы этих планет, наблюдается увеличение относительного содержания более тяжелых элементов, и соответственно Уран и Нептун обладают большей по сравнению с Юпитером и Сатурном средней плотностью. Существенную роль здесь могло сыграть то обстоятельство, что на ядрах Юпитера и Сатурна произошла аккумуляция основной части водорода и гелия из окрестностей протопланетной туманности, в результате чего Уран и Нептун оказались обедненными этими элементами. Один Юпитер «собрал» такое количество вещества, что его масса в два с половиной раза превосходит суммарную массу всех остальных планет. В то же время при более низких температурах в области Урана и Нептуна на них наиболее эффективно конденсировались аммиак и метан. Можно поэтому думать, что гигантские планеты, пройдя эволюционный процесс сжатия, претерпели наименьшие изменения со времени аккумуляции.

Процесс сжатия Юпитера и Сатурна от момента завершения начальной фазы, охватывающей первые примерно 10 млн. лет, до современных размеров, согласно теоретическим моделям А. Камерона и Д. Поллака, показан на рис. 48. За время, прошедшее от начала образования, первичное облако газа уменьшилось приблизительно на три порядка величины, из которых свыше двух порядков приходится на начальную фазу. Наиболее вероятно, что преобразование высвобождающейся при сжатии гравитационной энергии в тепло обусловливает избыточное излучение этих планет по сравнению с получаемым от Солнца в современную эпоху — приблизительно в 2—2,5 раза для Юпитера и почти в 2 раза для Сатурна. Требуемая величина сжатия Юпитера составляет при этом около 1 мм/год. Следствием является превышение измеряемых яркостных температур над равновесными (эффективными) температурами, вычисляемыми из условия баланса поступающей к планете солнечной энергии и энергии, излучаемой ею в окружающее космическое пространство.

Расчетный ход изменения величин излучения в процессе эволюции также показан на рис. 48, откуда видно, что на ранней стадии формирования светимость Юпитера могла составлять около 1% светимости Солнца! Можно поэтому думать, что за счет быстрого сжатия развились высокие температуры недр этих планет и наблюдаемый избыток излучения связан не с выделением гравитационной энергии, а с продолжающимися их остыванием в современную эпоху. Из других гипотетических источников

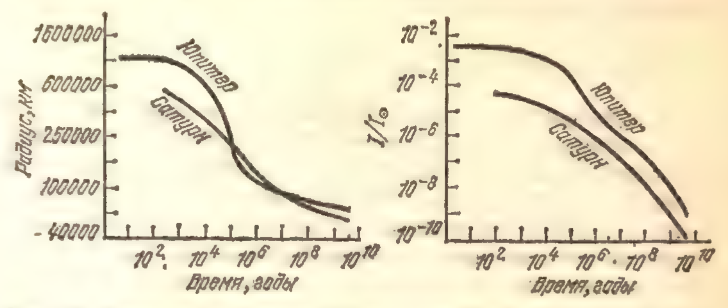


Рис. 48. Эволюция размеров и светимости Юпитера и Сатурна от момента начала аккумуляции до настоящего времени. Слева — ход сжатия; справа — уменьшение светимости планеты I относительно светимости Солнца $I_\odot$ (по Д. Поллаку и А. Камерону).

для объяснения этого феномена представляет также интерес возможность тепловыделения вследствие непрерывно происходящего перехода молекулярного водорода в металлический или выпадения гелия из водородно-гелиевого раствора по причине его несмешиваемости с металлическим водородом, с последующим дрейфом к центру планеты: как показали расчеты, такая химическая дифференциация и «отток» гелия внутрь из внешних молекулярных областей способны в принципе обеспечить требуемую величину генерируемой в недрах энергии.

На других расположенных гораздо ближе к Солнцу и значительно менее массивных планетах потеря самых легких элементов — водорода и гелия и таких легкокипящих соединений, как вода, метан, аммиак произошла уже на стадии аккреции или вскоре после завершения ее основной фазы. Этому способствовали как низкие скорости убегания, так и существенно более высокие эффективные температуры, падающие обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца. Как уже отмечалось,

температура и давление солнечного излучения могли заметно повлиять уже на сам состав протопланетного облака путем фракционирования первичного вещества за счет выметания части летучих из областей формирования земных планет. Между тем на больших расстояниях, где формировались гиганты, дополнительное понижение температуры (вплоть до температур конденсации газов) могло произойти за счет экранирования солнечного излучения пылевой компонентой первичного облака до момента ее исчерпания.

МОДЕЛИ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ

Рассмотренные выше механические свойства планет — масса, размеры, особенности фигуры и вращательного движения — имеют важнейшие следствия для проблемы их внутреннего строения. Распределение масс в недрах планеты определяет ее гравитационный потенциал и моменты инерции. Реальный гравитационный потенциал отличается от простейшего ньютоновского потенциала, описывающего сферически симметричное распределение плотности в зависимости от радиуса, и может быть представлен в виде разложения по сферическим функциям. Главный член ряда соответствует потенциалу притяжения шара с массой, равной массе планеты, а члены второго и более высокого порядка (так называемые зональные и тессеральные гармоники) отражают детали ее внутреннего строения.

Четные и нечетные гармоники учитывают соответственно отклонения в распределении плотности от сферически симметричного и гидростатически равновесного. Они характеризуются мультипольными моментами J_n, определяемыми по величине возмущений орбит естественных и искусственных спутников и траекторий движения пролетных космических аппаратов. Основной вклад вносит первый поправочный член второго порядка, пропорциональный квадрупольному моменту J_2, учитывающий сжатие планеты. Соответственно J_2, определяемый как $J_2 = \frac{C-A}{MR_э^2}$, по величине порядка сжатия α (все обозначения приведены на с. 28—43). Последующие зональные моменты у тела, находящегося в гидростатическом равновесии, убывают пропорционально второй и последующим степеням сжатия. На величину моментов выше

J_4 влияют главным образом внешние слои планеты, поэтому они говорят существенно меньше о ее внутренней структуре.

С моментом J_2 непосредственно связан другой важный параметр, отражающий ход изменения плотности с глубиной. Это безразмерный момент инерции $I = \frac{\bar{I}}{M\bar{R}^2}$, выражаемый через средний момент инерции в виде $\bar{I} = \frac{C+2A}{3}$ и средний радиус $\bar{R}$, или, в упрощенной форме, через момент инерции относительно полярной оси и экваториальный радиус $R_э$, т. е. $I \simeq \frac{C}{MR_э^2}$ (см. табл. I). В случае, если плотность по всей толщине сохраняется постоянной (модель однородной сферы), $I = 0{,}4$. Если же плотность с глубиной возрастает, то $I < 0{,}4$, а в противоположном случае $I > 0{,}4$. Так, для Земли экспериментальное значение $I = 0{,}3315$ соответствует существенному росту плотности к центру, что в действительности и имеет место, поскольку тяжелая компонента в основном сосредоточена в ядре.

Мультипольные моменты налагают предельные условия на положение эквипотенциальных (уровенных) поверхностей, рассчитываемых в теории фигуры гравитирующих тел и особенно широко используемых при расчетах моделей внутреннего строения гигантов. У планеты, находящейся в состоянии гидростатического равновесия, эквипотенциальные поверхности характеризуются одинаковыми значениями давления P, плотности ρ, температуры T и других термодинамических характеристик вещества. О степени отклонения от гидростатического равновесия можно судить по величине первого нечетного момента J_3. Для Земли он неожиданно оказался довольно большим, порядка квадрата сжатия. Это говорит об отклонении фигуры Земли от равновесной (на величину порядка Ra^2 у поверхности) и о наличии в ее недрах, наряду с радиальными напряжениями, обусловленными давлением, касательных напряжений. Величина их на несколько порядков меньше по сравнению с радиальными, составляя тем не менее несколько десятков килограмм на квадратный сантиметр.

В то же время большие планеты, прежде всего газо-во-жидкие Юпитер и Сатурн, по своему состоянию наи-

более близки к гидростатически равновесному. В их гравитационных потенциалах не обнаружено сколь-нибудь заметного вклада от момента J_3 по результатам измерений, проведенных на космических аппаратах «Пионер» и «Вояджер». На это же указывает избыточное излучение энергии вследствие теплового потока из недр. Определяющую роль должен здесь играть конвективный теплоперенос, а не значительно менее эффективный механизм молекулярной теплопроводности: легко показать, что на характерном размере порядка радиуса планеты роль этого механизма пренебрежимо мала и может вносить некоторый вклад в охлаждение лишь самых внешних областей. Основное перемешивание, по-видимому, происходит в пределах отдельных оболочек из-за различий в плотности вещества, хотя четкой границы раздела между ними, возможно, и нет. Вместе с тем, на Юпитере и Сатурне может создаваться определенное запирающее влияние градиента концентрации гелия по высоте, связанного с упоминавшимся возможным механизмом его высвобождения из водородно-гелиевого раствора.

О конвективной активности недр говорит также наличие у Юпитера и Сатурна собственных магнитных полей, в формировании которых, очевидно, участвуют не только центральные области, но и расположенные ближе к поверхности оболочки. Наряду с получившей наибольшее признание теорией планетарного магнитного динамо, в качестве альтернативных механизмов генерации магнитного поля рассматриваются движения, индуцируемые прецессией оси вращения планеты, и возбуждение термоэлектрической ЭДС при конвективном переносе на границах областей с несколько отличающимся химсоставом.

Напряженность магнитного поля Юпитера на экваторе по данным измерений с космических аппаратов «Пионер» и «Вояджер» составляет 4,2 гаусса (Гс), что почти на порядок превосходит напряженность магнитного поля Земли. Полярность его обратна полярности земного поля, т. е. северный и южный магнитные полюса близки к соответствующим географическим (точнее иовиграфическим) полюсам, а не противоположны им, как на Земле. Приведенное значение напряженности поля относится к его основной дипольной составляющей; наряду с ней обнаружены заметные квадрупольная и окту-

польная составляющие, относительный вклад которых по величине примерно аналогичен относительному вкладу тех же составляющих в земное поле. Ось магнитного диполя Юпитера не совпадает с осью вращения, а центр диполя смещен относительно центра планеты в северное полушарие. Поэтому на полюсах напряженность поля различна: на северном она составляет 14 Гс, а на южном — 11 Гс.

Напряженность магнитного поля Сатурна оказалась значительно меньше, в хорошем согласии с величиной, предсказанной советским исследователем Ш. Ш. Долгиновым, исходя из механизма прецессии. По данным измерений с космического аппарата «Пионер-11» она составляет на экваторе 0,2 Гс, на полюсах 0,56 Гс, полярность поля также противоположна земной, а угол между осью диполя и осью вращения меньше 2—3°. Данные о наличии магнитных полей у Урана и Нептуна пока еще окончательно не подтверждены.

Значительному прогрессу в моделировании структуры гигантов способствовали как новые данные наблюдений и развитие теории фигуры гравитирующих тел, так и успехи физики высоких давлений. Последние связаны прежде всего с уточнением уравнения состояния $P=P(\rho, T)$ для водорода и гелия, а также для тяжелой и ледяной компоненты при высоких давлениях и температурах, поскольку уравнение состояния реального газа применимо для расчетов лишь самых внешних областей. Помимо того, что изменение давления среды функционально зависит не только от изменения температуры, но и от плотности и концентрации компонентов (что само по себе сильно осложняет описание ее термодинамического состояния), теоретическое описание условий образования и устойчивости фаз при высоких давлениях и температурах представляет сложную самостоятельную проблему. Вещество приобретает при этом необычные свойства, ярким примером одного из которых служит переход водорода в металлическое состояние.

Он образуется в условиях больших давлений, когда внешние атомные оболочки оказываются «раздавленными». Плотность металлического водорода грубо можно оценить, полагая, что расстояние между протонами порядка радиуса Бора $a_0=\hbar^2/me^2=0{,}529\cdot10^{-8}$ см (здесь m и e — масса и заряд электрона, $\hbar=h/2\pi$, где h — постоянная Планка). Поскольку масса протона $M=1{,}67\cdot10^{-24}$ г,

получаем $\rho \sim M/a_0^3 \approx 10$ г/см³. На самом деле эта оценка оказывается почти на порядок завышенной: более строгие, хотя и не очень надежные расчеты показывают, что при давлении 2,6 миллионов атмосфер (2,6 мегабар, или сокращенно Мбар) металлический водород находится в термодинамическом равновесии с молекулярным водородом, и его плотность равна 1,15 г/см³. Для перехода гелия в металлизованное состояние требуется давление около 90 Мбар, которое не достигается внутри Юпитера. С наличием протяженного слоя проводящего металлического водорода определенно связана большая величина магнитного момента у этой самой крупной планеты Солнечной системы.

Данные о поведении вещества в экстремальных условиях основываются на представлениях статистической физики и квантовой механики. В самом общем случае термодинамическое состояние жидкого и металлического водорода, льдов и вещества горных пород на больших глубинах описывается уравнением состояния в так называемом дебаевском приближении, при известной или дополнительно рассчитанной зависимости от плотности характеристической (дебаевской) температуры θ. Эта температура выражается в виде $\theta = h\nu/k$, где ν — максимальная частота колебаний атомов кристалла, распространяющихся по нему в виде волн, каждую из которых можно представить в виде квазичастицы — кванта колебательного движения, или фонона. Произведение $k\theta$ (k — постоянная Больцмана) характеризует в этом случае энергию самых коротковолновых фононов в веществе.

Понятие фонона позволяет изучать тепловые и другие свойства твердых тел и вещества, находящегося в области сверхвысоких давлений, используя методы кинетической теории газов. При расчетах самых глубоких слоев, где температуры достигают десяти и более тысяч градусов, иногда вводятся высокотемпературные поправки, учитывающие появляющиеся отклонения колебаний атомов в кристаллах от квазигармонического приближения, а также влияние термически возбужденных электронов проводимости. В квазигармоническом приближении вводится еще одна чрезвычайно важная для расчетов моделей внутреннего строения переменная — так называемый параметр Грюнайзена, характеризующий изменение частоты колебаний в зависимости от плотности. Вместе с дебаевской температурой он полностью оп-

ределяет термодинамическое состояние соответствующей модели твердого тела.

Поскольку давление с глубиной быстро нарастает, слагающие внешние оболочки больших планет водород и гелий находятся в закритическом состоянии. Критические значения давления и температуры, представляющие собой физико-химические константы вещества, равны для водорода 12,8 атм и 33 К, а для гелия 2,3 атм и 5 К. При давлении ниже критического смесь распадается на две равновесные фазы — жидкость и пар, а при давлении выше критического происходит непрерывный переход газовой фазы в жидкую, физическое различие между фазами исчезает, и смесь становится однородной. Нетрудно видеть, что газовые оболочки этих планет должны иметь небольшую протяженность, и эти оболочки можно относить к атмосфере.

Температура и давление, определяемые на уровнях атмосферы, где формируется собственное и отраженное излучение планеты, служат необходимыми граничными условиями в расчетах моделей внутреннего строения, обеспечивая исходные значения для экстраполяции термодинамических параметров вглубь. Нижние границы температур в недрах дает экстраполяция по изотерме (холодные модели), а верхние границы — экстраполяция по адиабате (горячие модели). Эти две модели можно рассматривать как предельные, поскольку трудно допустить наличие сверхадиабатического градиента температуры в условиях, не препятствующих перемешиванию. К наиболее убедительным результатам, устанавливающим вероятный диапазон параметров в центральных областях, приводит адиабатическая экстраполяция. Ее обоснованность в приложении в первую очередь к Юпитеру и Сатурну подкрепляется, как мы видели, достаточно надежно установленными фактами, что обе эти планеты находятся в конвективном равновесии.

За изменением термодинамического и агрегатного состояния на глубине позволяют проследить показатели политропы и фазовые диаграммы для водородно-гелиевого раствора, определяемые в зависимости от парциальных давлений компонентов и температуры. В большинстве моделей используется допущение, что вещество Юпитера и Сатурна по своему составу соответствует солнечному, т. е. относительное содержание гелия по массе около 20%, или на 1 атом гелия приходится примерно

15 атомов водорода. Данные измерений содержания гелия и отношения He/H_2 в атмосфере Юпитера, а также полученное удовлетворительное согласие вычисленных параметров фигуры с наблюдаемыми приводили до недавнего времени к выводу о том, что такой состав действительно дает наилучшие результаты, а компоненты более тяжелые, чем водород и гелий, практически не оказывают влияния на внутреннюю структуру. Между тем, как показали более поздние расчеты, ситуация, видимо, сложнее. При солнечном отношении обилий водорода и гелия следует допустить наличие у Юпитера сравнительно крупного ядра, состоящего из тяжелой и ледяной компонент, а также добавить в оболочку воду, обилие которой на Юпитере оценивается величиной, приблизительно в 15 раз превышающей ее обилие в веществе солнечного состава (или, в абсолютном содержании $\approx 1{,}8 \cdot 10^{29}$ г, что соответствует примерно 30 массам Земли). В то же время отношение общего содержания воды к тяжелой фракции вещества ядра Юпитера сильно зависит от принимаемого начального значения температуры T_0 на уровне с давлением в 1 атм, от которого проводится экстраполяция в глубину: при увеличении этой температуры масса избыточной воды резко растет, а масса ядра уменьшается. Приведенному выше обилию H_2O отвечает значение $T_0 \sim$ ~ 190 К, которое, возможно, является несколько завышенным. Что касается Сатурна, то, как следует из моделей, у него основная масса воды вместе с метаном и аммиаком сосредоточена в ледяной оболочке, непосредственно примыкающей к ядру.

Если эти результаты в дальнейшем подтвердятся, они будут иметь важное значение для лучшего понимания особенностей раннего этапа эволюции больших планет. Их можно рассматривать как указание на то, что на стадии аккреции действовал механизм разделения фаз, отделивший воду, аммиак, метан от более тяжелой фракции, и его эффективность была тем выше, чем ниже были температуры в областях формирования планеты. Поэтому образовались столь значительные ледяные оболочки у Урана и Нептуна, на Сатурне она осталась относительно небольшой, а на Юпитере, подвергшемся наиболее высокотемпературной (среди планет-гигантов) фазе эволюции, не сохранилась вовсе, перейдя в виде примеси в основной водородно-гелиевый раствор. Эти рассуждения, конечно, носят довольно иллюстративный характер, но,

к сожалению, сейчас мы не располагаем более надежными данными.

Количественные оценки отношения обилий сосредоточенных в ядре и мантии компонент, к сожалению, осложняются тем, что масса ядра, вообще говоря, слабо влияет на значения гравитационных моментов, с которыми сопоставляются результаты расчетов. К этому следует добавить, что при сохраняющейся неопределенности уравнения состояния молекулярного водорода можно удовлетворить ограничениям, накладываемым на эти результаты и без использования допущения о повышенном содержании в мантии компонентов тяжелее гелия, таких, как вода. Определенные возможности связываются здесь рядом исследователей с более полным анализом термодинамики молекулярного водорода, в частности, с учетом степени растворимости гелия в металлическом водороде при высоких температурах и давлениях. Как бы то ни было, на сегодня наиболее реальной кажется оценка относительной величины ядра порядка 3—4% по массе для Юпитера и 20—25% для Сатурна. Массы же ядер Урана и Нептуна вместе с ледяными оболочками достигают в расчетных моделях относительной величины 85—90%. Следует заметить, что новые значения периода вращения этих планет (см. табл. 1) приводят к значительно лучшему согласию с такими моделями величин квадрупольного момента J_2, определенных по возмущениям в движениях спутников Урана Ариэля и Миранды и спутника Нептуна Тритона, хотя в оценках этих величин все еще сохраняется пока значительный разброс.

Адиабатические модели внутреннего строения планет-гигантов, отвечающие современным представлениям о многослойной дифференциации вещества, на примерах Юпитера и Урана показаны на рис. 49. Значительная часть внутренних областей Юпитера и в меньшей степени Сатурна сложена проводящим металлическим водородом. Промежуточные оболочки Урана и Нептуна (и, вероятно, оболочка Сатурна, примыкающая к ядру) состоят из водородных соединений, представляющих собой смесь водяного и аммонийно-метанового льдов.

Содержание водорода в несвязанном состоянии на Уране и Нептуне значительно меньше, чем на Юпитере и Сатурне. Большая протяженность зон твердого вещества (не менее 3/4 радиуса) сближает эти планеты с планетами земной группы. Вместе с тем можно предполагать,

что из-за малой вязкости льда сохраняется применимость к Урану и Нептуну механических концепций модели газово-жидкой планеты, находящейся в состоянии гидростатического равновесия. Самые внешние оболочки, расположенные над протяженными слоями твердого и жидкого вещества, представляют собой сравнительно тонкие слои, образованные в основном газообразными водородом и гелием.

В разработку концепции газово-жидких планет-гигантов, в изучение уравнения состояния вещества при высоких температурах и давлениях, теории фигуры и

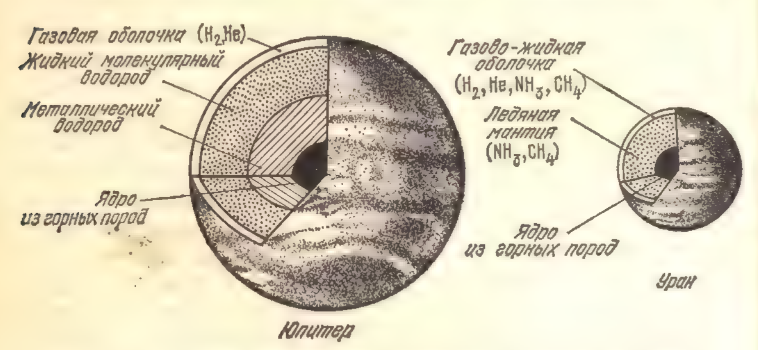


Рис. 49. Модели внутреннего строения Юпитера и Урана.

расчеты современных моделей их внутреннего строения значительный вклад внесен советской геофизической школой. Мы приведем значения основных параметров в недрах планет-гигантов согласно моделям, полученным В. Н. Жарковым, В. П. Трубицыным и их сотрудниками.

Температура и давление в ядре Юпитера при отношении He/H, близком к солнечному, оказываются равными $T \approx 25 \cdot 10^3$ K и $P \approx 80$ Мбар, а в ядре Сатурна $T \approx 20 \cdot 10^3$ K и $P \approx 50$ Мбар. Переход водорода в жидкую фазу на Юпитере происходит на уровне $\approx 0{,}98\ R$, а переход в металлическую фазу — на уровне $\approx 0{,}76\ R$ при давлении $P \approx 3$ Мбар и температуре $\approx 10\,000$ K. Видимо, скачка плотности при этом не происходит в силу непрерывности процесса металлизации в жидком водороде. Металлическая оболочка простирается до границы с ядром на уровне $\approx 0{,}15\ R$. В модели Сатурна металлический водород образуется, начиная с уровня $\approx 0{,}46\ R$, и заполняет слой приблизительно до $0{,}27\ R$, где начинается ядро.

Давление на поверхности юпитерианского ядра оценивается равным ≈ 45 Мбар, а на поверхности ядра Сатурна — около 10 Мбар. Адиабатические модели внутренней структуры Урана и Нептуна, в которых исходный состав элементов соответствует космической распространенности, а относительное содержание водорода и гелия составляет не более 5—8% по массе, приводят к значениям температуры и давления: в центре Урана $T=(10—12)\cdot 10^3$ К и $P\approx 5{,}5—6$ Мбар, а в центре Нептуна $T=(12—14)\cdot 10^3$ К и $P\approx 7—8$ Мбар. Границы их протяженных ледяных оболочек (ядер) начинаются при давлении около 100 кбар.

ВЕЩЕСТВО ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ И МЕТЕОРИТОВ

Внутреннее строение планет земной группы вследствие иного преобладающего элементного состава и условий формирования отличается наличием по всей толщине вещества горных пород с частично расплавленной мантией и твердой корой, на поверхности которой можно найти следы геологической истории планеты. Различие в плотностях этой группы планет (см. табл. 1) вместе с результатами модельных расчетов приводят к представлениям о неоднородном химическом составе первичного вещества вследствие фракционирования элементов не только во всей протопланетной туманности, но даже в пределах 1—2 а. е. Речь идет прежде всего о металло-силикатном фракционировании из-за различия температур конденсации горячего газа солнечного состава, приведшем к неодинаковому содержанию железа и кремния на разных удалениях от Солнца. Сюда же относится фракционирование железа и серы (точнее, определяемых ими групп так называемых сидерофильных и халькофильных элементов). Соответственно с ростом гелиоцентрического расстояния возрастало отличие первичного вещества от состава железных метеоритов за счет большего окисления железа (с образованием силикатов) и одновременно повышенного содержания в нем сульфидной части. Здесь можно усмотреть некоторую аналогию со степенью фракционирования тяжелой и ледяной компонент в зависимости от расстояния от Солнца: последняя обладает наиболее низкой температурой конденсации, и потому составляет основную долю массы самых далеких планет и их спутников.

То относительно небольшое количество вещества протопланетной туманности, из которого формировались в ближайших окрестностях Солнца планеты и астероиды, по своему составу, очевидно, соответствовало веществу метеоритов,— именно поэтому мы прибегли к сравнению с ними, говоря о фракционировании первичного вещества. Эти космические посланцы содержат информацию о начальном этапе зарождения крупных тел около 4,6 млрд. лет назад: таков возраст подавляющего большинства выпадавших на Землю метеоритов, определенный по изотопным отношениям свинца $^{207}Pb/^{206}Pb$ и стронция к рубидию $^{87}Sr/^{87}Rb$, а в самое последнее время — также наиболее высокоточным методом, по отношению самария к неодиму $^{147}Sm/^{144}Nd$. Сейчас уже, пожалуй, не вызывает сомнения, что метеориты образовались в результате дробления этих тел, поэтому их можно рассматривать как обломки астероидов.

Известно, что в зависимости от соотношения двух основных фаз — металлической (железоникелевой) и каменной (силикатной) — метеориты делятся на три обширных класса: железные, железокаменные и каменные. В первых преобладает первая фаза (до 94%, включая Fe и Ni как в свободном, так и связанном состоянии), в последних — вторая фаза (до 80%), а в железокаменных содержатся примерно одинаковые количества железа и силикатов. Помимо этих двух основных фаз, в каждом классе метеоритов присутствует также сульфидная, или троилитовая, фаза, входящая в состав сернистого железа (троилита) и ряда других породообразующих минералов.

По распространенности (частоте падений) значительно преобладает класс каменных метеоритов — свыше 90% в относительном исчислении, в то время как частота падений железных метеоритов не превышает 6%, а железокаменных — 1,5%. Среди каменных метеоритов, в состав которых входят главным образом литофильные элементы, образующие устойчивые природные соединения с кислородом (натрий, калий, магний, алюминий, кремний, кальций и, конечно, кислород) основное место занимают хондриты. Это название они получили из-за содержащихся в их структуре сферических частиц диаметром порядка 1 мм — хондр, состоящих из силикатных минералов. Других метеоритов этого класса (ахондритов) приблизительно на порядок меньше, и по их текстуре

(размытости границ между хондрами и вмещающим веществом) можно предполагать, что при своем образовании они подверглись значительно более сильному нагреву, чем хондриты.

От вариаций температуры и давления в первоначально химически однородном протопланетном диске зависит содержание наиболее обильных и химически активных элементов — водорода, углерода, кислорода, магния, кремния, серы, железа (см. рис. 47). С ростом температуры должно возрастать относительное содержание железа вследствие потери силикатов и преобладания восстановительных процессов над окислительными из-за потери летучих. Обычные хондриты, обогащенные железом, образуют группу H, а обедненные им — группу L. Наибольшей степенью восстановления обладают энстатитовые хондриты, состоящие в основном из минерала семейства магнезиальных силикатов — энстатита ($MgSiO_3$) и никелистого железа, а наибольшей степенью окисления — группа углистых хондритов, или группа C, у которых почти все железо связано в магнетите (Fe_3O_4). Последние, как отмечалось, отличаются также самым высоким содержанием летучих и представляют особый интерес.

Действительно, если сопоставить их состав со сводкой распространенности химических элементов согласно кривой на рис. 47, то можно убедиться в том, что он почти не отличается от состава солнечного вещества, за исключением весьма летучих (атмофильных) элементов, к которым относятся водород, азот и инертные газы. Это дает основание считать, что углистые хондриты наиболее близки к первичной химической смеси, из которой в дальнейшем формировались планеты земного типа и астероиды. Метеориты этой группы, содержащие темное углистое вещество, имеют очень низкое альбедо (около 5%). Наблюдения показывают, что таким альбедо как раз обладает большинство объектов в астероидном поясе, поэтому можно думать, что состав их близок к углистым хондритам. Значительно меньшее число астероидов по своим отражательным свойствам отвечает составу железокаменных метеоритов.

Все это приводит к представлениям о том, что химическая классификация и структура метеоритов непосредственно связана с их происхождением. Во-первых, общая родословная метеоритов и астероидов позволяет предполагать, что сами материнские тела находились на

разных ступенях эволюции, в зависимости от размеров. Если хондриты произошли от сравнительно небольших химически недифференцированных тел, образовавшихся путем конденсации первичного вещества на различных удалениях от Солнца, то железные метеориты и ахондриты по всей вероятности являются осколками более крупных астероидов, вещество которых испытало процесс дифференциации в их недрах. Некоторая часть железных метеоритов могла, однако, возникнуть и непосредственно, как первичный продукт конденсации из газовой фазы железа в протопланетной туманности, на что впервые указал крупнейший советский геохимик А. П. Виноградов. Во-вторых, по степени окисления железа, содержащегося в метеоритах, можно судить об условиях конденсации, прежде всего температуре в различных частях протопланетной туманности. Можно думать, что железные метеориты и энстатитовые хондриты, отличающиеся наиболее полной степенью восстановления, образовывались преимущественно при высокой температуре на ближайших расстояниях от Солнца, в пределах приблизительно орбиты Меркурия, в то время как максимально окисленные углистые хондриты — при значительно более низких температурах, преимущественно за орбитой Марса, где из них сформировалось подавляющее большинство астероидов в астероидном поясе и ядра планет-гигантов. Смесь окислов металлов и гидратированных силикатов, слагающих данную группу хондритов, вошла, следовательно, в состав тяжелой компоненты этих планет, или, как мы еще ее называли, вещества горных пород. Это же предопределило различие в составе и средней плотности земной группы планет и ход их последующей тепловой эволюции.

Таким образом, мы видим, что основные химические превращения первичного вещества происходили при относительно высоких температурах в ближайших окрестностях Солнца. При этом важнейшую роль играли окислительно-восстановительные процессы, в то время как на больших удалениях от Солнца при низких температурах реакции были заторможены, и состав первичного вещества, очевидно, остался почти неизменным. В составе высокотемпературной фракции конденсированных твердых частиц, из которых аккумулировались планеты земной группы, содержались радиоактивные элементы, послужившие источником их последующего разогрева.

Поэтому именно на этих планетах произошли наиболее грандиозные изменения в процессе эволюции, приведшие в конечном итоге к дифференциации слагающего вещества и образованию вторичных газовых оболочек — атмосфер.

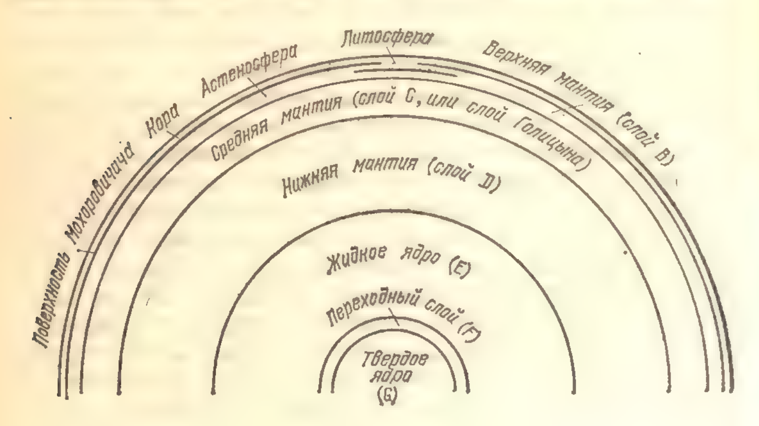
К сожалению, строгое количественное обоснование всех этих сложных процессов с использованием методов теоретического моделирования осложняется незнанием многих начальных условий эволюционного процесса, таких, как распределение температуры и концентраций компонентов, значения давлений, при которых происходила первичная конденсация твердых веществ, скорости химических реакций и интенсивность перемешивания вещества после завершения аккумуляции, скорости дегазации из недр и эффективность связывания газовых составляющих твердым веществом и т. п. Вместе с тем исследование самой внутренней структуры планет земной группы в известной степени облегчается наличием своего рода эталонов в виде Земли и Луны, для которых доступен мощный метод исследования их недр по распределению скоростей распространения сейсмических волн. Он дает изменение характеристик упругости с глубиной и тем самым позволяет выявить наиболее характерные черты внутренней структуры тела, определяемой составом вещества, его фазовым состоянием и термодинамическими параметрами.

СОСТАВ И ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ И ЛУНЫ

Современные представления о внутреннем строении Земли показаны на рис. 50, где выделены основные зоны, в пределах которых происходит изменение скоростей распространения продольных (P) и поперечных (S) волн. Такие волны называют объемными. Они возникают в очагах землетрясений и порождаются их сейсмической энергией, обусловленной тектоническими процессами. Проникая в глубь Земли, объемные волны изменяют свою скорость, испытывая преломление и отражение на границах раздела (оболочек) с различными физическими свойствами. Эти свойства характеризуются модулем сжатия и модулем сдвига вещества для P-волн и только модулем сдвига для S-волн. У жидких сред модуль сдвига равен нулю, и соответственно скорости поперечных волн также обращаются в нуль. Отсюда ясно, что если среда

не пропускает через себя эти волны, ее следует считать жидкой. Именно такая ситуация наблюдается внутри Земли на границе с ядром.

В пределах каждой из трех основных оболочек Земли — коры, мантии и ядра выделяется ряд дополнительных особенностей (зон), с которыми связано изменение



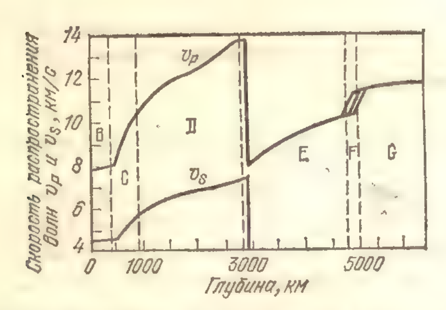


Рис. 50. Модель внутреннего строения Земли и скорость распространения продольных (v_P) и поперечных (v_S) сейсмических волн.

скоростей проходящих через них сейсмических волн. Поэтому рассмотрим показанный на рисунке разрез Земли и номенклатуру зон подробнее.

Самая верхняя твердая оболочка — кора — отделена от нижележащих слоев мантии границей раздела, при переходе через которую скорости P-волн возрастают скачком от 6,7—7,6 км/с до 8—8,3 км/с, а S-волн от 3,6—4,2 км/с до 4,4—4,7 км/с. Эта граница носит название по-

верхности Мохоровичича по имени югославского геофизика, установившего ее существование в 1909 г. Поверхность Мохоровичича (или просто Мохо) проходит на разной глубине из-за различной толщины земной коры — от 30—60 км под материками до 5—10 км под океанами. В осевых зонах срединно-океанических хребтов, где находятся рифтовые долины, она максимально приближается к поверхности. Срединно-океанические хребты с их рифтовыми зонами относят к областям расширения земной коры, продолжающегося в современную эпоху. В рифтовых зонах концентрируются очаги многочисленных землетрясений и вулканической деятельности, обнаружены аномально высокий тепловой поток из недр и уменьшение плотности верхней мантии.

Земная кора, образовавшаяся в результате выплавления из мантии, сложена совокупностью различных минералов, состоящих из типичных литофильных элементов со свойствами силикатных пород. Преобладающим (49,13% по массе) является кислород, находящийся в виде окислов металлов и кремния. За ним идут кремний (26%), алюминий (7,45%) и железо (4,2%). Эти элементы имеют наибольшее весовое содержание, или, как говорят, наибольшие кларки. Так называют проценты элементов по массе в честь американского геохимика Фрэнка Кларка, впервые определившего в 80-х годах прошлого столетия средний состав земной коры. Преобладание кислорода, кремния и алюминия обусловливает то, что бóльшая часть минералов относится к разряду силикатов и алюмосиликатов, т. е. является солями кремниевых и алюмокремниевых кислот. При замещении водорода алюмокремниевой кислоты калием, натрием и кальцием получаются наиболее распространенные минералы — полевые шпаты, к которым, в частности, относятся хорошо известные натриево-кальциевые алюмосиликаты-плагиоклазы, а при замещении водорода кремниевых кислот магнием, железом и кальцием — оливины, пироксены и амфиболы. Основу коры составляют изверженные (магматические) горные породы — базальты и граниты. В зависимости от содержания кремнезема (SiO_2) они подразделяются на кислые (более 65%), средние (52—65%), основные (40—52%) и ультраосновные (меньше 40%). Магматические породы кристаллизуются из обогащенного газами алюмосиликатного расплава — так называл его выдающийся русский ученый В. И. Вернад-

ский, впервые указавший на близость свойств алюминия и кремния при геохимических процессах и образовании природных соединений. При излиянии этого расплава на поверхность в виде лав и интенсивной дегазации образуются излившиеся (эффузивные) основные породы коры — базальты, а при застывании на глубине — более кислые граниты, габбро и некоторые другие разновидности внедрившихся (интрузивных) пород. В базальтах преимущественно содержатся такие минералы, как плагиоклазы, пироксены, оливины. Обычно различают два основных типа базальтов — толеитовые, несколько пересыщенные кремнеземом, и щелочные, недосыщенные им. По своему составу толеитовые базальты, по-видимому, наилучшим образом отражают состав верхней мантии в областях проявления магматической активности. По сравнению с базальтами граниты содержат больше кремнезема и меньше железа и магния. В их составе преобладают полевые шпаты, водные алюмосиликаты (слюды), и кварц, представляющий собой кристаллические модификации (гексагональную и тригональную) кремнезема.

Изверженные породы частично претерпевают изменения (метаморфизацию) под действием высокой температуры и давления на глубине, вследствие чего образуется отличающийся от гранитов метаморфический тип горных пород — таких, как гнейсы, сланцы, пегматиты. Верхняя часть коры представляет собой прерывистый осадочный слой, состоящий из разрушенных и обычно слабоизмененных вулканических пород, а также различных переотложений, в том числе связанных с деятельностью биосферы. Континентальная кора под осадочным слоем делится на две части: гранитный слой, сложенный преимущественно гранитами и гнейсами, и расположенный под ним базальтовый слой, сложенный в основном базальтами и его глубинными аналогами — габбро, имеющими схожий химический состав. Базальтовый слой океанической коры непосредственно примыкает к слою осадков, нижнюю уплотненную часть которого называют также надбазальтовым слоем коры. Высказываются предположения, что формирование коры океанического типа продолжается в настоящее время в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов за счет дифференциации поступающего по разломам мантийного вещества.

Под корой находится верхняя мантия (зона B). Ее верхний слой, подстилающий кору, иногда называют

субстратом. Вместе с корой он образует литосферу — самую жесткую оболочку Земли, ниже которой находится близкий к расплавлению слой пониженной прочности — астеносфера. Его часто отождествляют со слоем Гутенберга, в котором отмечается заметное уменьшение скоростей поперечных сейсмических волн. Причинами их замедленного прохождения, по-видимому, являются большой геотермический градиент в астеносфере и значительное (на два-три порядка) уменьшение вязкости вещества по сравнению с литосферой. Нижняя граница астеносферы лежит на глубине 250—350 км, а ее верхняя граница ближе всего подходит к поверхности под осями срединно-океанических хребтов. При переходе к зоне C, называемой средней мантией, или слоем Голицына, скорости сейсмических волн возрастают вплоть до глубины около 1000 км, где расположена граница с нижней мантией (зона D′), а в нижней мантии рост скоростей резко замедляется. Между нижней мантией и ядром выделяют небольшой (около 200 км толщиной) переходный слой D″, с дополнительным небольшим уменьшением скоростей *P*-волн.

Рост сейсмических скоростей в зоне C обусловлен фазовыми переходами, за счет перестройки минералов в модификации с более плотной упаковкой атомов. В отличие от кислых и основных пород коры, мантия состоит из ультраосновных пород, содержащих наименьшие количества кремнезема SiO_2 в виде минерала кварца и одновременно большое количество окиси магния в составе нескольких типов минералов. Главными породообразующими минералами основных и ультраосновных пород (базальтов, дунитов, габбро, перидотитов, диабазов и др.) являются железо и магний-содержащие силикаты — оливины и пироксены, имеющие соответственно формулы $(Mg, Fe)\ SiO_4$ и $(Mg, Fe)\ SiO_3$. Из оливин-пироксеновой породы (так называемого пиролита) предположительно состояла первичная мантия Земли до дифференциации слагающего планетного вещества.

Согласно современным представлениям, подкрепленным лабораторными петрохимическими исследованиями минералов при значениях параметров земных недр, оливины верхней мантии на границе зон B и C (400—420 км) в результате полиморфного фазового перехода перестраиваются в структуру модифицированной шпинели, находящейся у магнезиального края оливинового ряда и об-

ладающей структурой с плотнейшей кубической упаковкой кислородных ионов. Данный переход объясняет возрастание на этом уровне скоростей *P*-волн. В свою очередь пироксены уже на глубине около 70 км кристаллизуются в ортопироксены и в присутствии окиси алюминия Al_2O_3 (глинозема, корунда) переходят в гранаты, а кварц — последовательно в структуры коэсита и стишовита — минерала, который на 62% плотнее обычного кварца. В средней мантии, начиная приблизительно с глубины 700 км, предполагается еще один фазовый переход от зоны шпинели к зоне перовскита — минерала, обладающего четко выраженной спайностью по кубу, т. е. особенно плотной кубической упаковкой. Здесь же структура корунда может перестраиваться в структуру ильменита при замене атомов алюминия на атомы железа и титана. В однородном слое D, по-видимому, представляющем собой целиком перовскитовую зону, скорости сейсмических волн растут (хотя и с меньшим градиентом) лишь за счет сжатия вещества под давлением вышележащих слоев и повышения его плотности.

В зоне E скорости продольных волн уменьшаются примерно вдвое, а поперечные волны через этот слой не проходят совсем. В то же время они вновь возбуждаются в центральной части (зоне G), отделенной от E небольшим слоем F толщиной около 150 км, где отмечается небольшое увеличение скоростей *P*-волн. Эти факты дают основание отождествить слой E с внешним жидким ядром радиусом около 3460 км, а слой G — с внутренним твердым (или скорее частично расплавленным) ядром радиусом 1250 км. Масса всего ядра составляет около 30% от массы всей Земли, в том числе масса внутреннего ядра 1,2%. Такому распределению масс в Земле в целом отвечают расчетные модели ее недр, строящиеся с учетом необходимости удовлетворить также значению приведенного нами ранее безразмерного момента инерции *I*.

По своему составу земное ядро, очевидно, близко к составу железных метеоритов и образовано железо-никелевым сплавом, сокращенно называемым «нифе» (примерно 89% Fe, 7% Ni, 4% FeS). До недавнего времени конкурирующей представлениям о железо-никелевом ядре была гипотеза В. П. Лодочникова и В. Рамзея, согласно которой земное ядро может состоять из металлизированных силикатов, образующихся в результате фа-

зовых переходов силикатов в металлическое состояние при давлениях порядка 1 млн. атм. Эта гипотеза не получила, однако, подтверждения в экспериментах по ударному сжатию при значениях параметров, отвечающих физическим условиям в ядре.

Железо-никелевый состав ядра отвечает двум существующим мнениям относительно его образования: путем выделения из расплава в процессе гравитационной дифференциации примерно однородной по составу ранней Земли, либо за счет гетерогенной конденсации твердых фаз в протопланетном облаке. В первом случае ситуация напоминает хорошо известный процесс плавления железа в доменных печах: доведенное до металлического состояния железо опускается на дно, образуя плотную жидкую фазу, а остающиеся более легкие силикаты всплывают к поверхности в виде шлака. Другой подход, развивавшийся А. П. Виноградовым, лучше согласуется с идеей о металл-силикатном фракционировании первичного вещества и образовании различного класса метеоритов. Основным аргументом служит здесь то обстоятельство, что с началом конденсации протопланетного облака из него в твердой фазе в первую очередь выделяется никелистое железо (при температуре 1460 К), затем образуются магнезиальные силикаты (форстерит, энстатит), а еще позднее различные низкотемпературные конденсаты (магнетит, троилит и др.). Металлические частицы значительно легче объединяются в компактные массы, чем силикатные, образуя вначале тела метеоритных размеров. Аккумулируясь, они могли служить зародышами будущих планет. Доля высокотемпературной фракции должна при этом убывать с увеличением расстояния от Солнца, что в действительности наблюдается для планет земной группы, если вспомнить о распределении их средней плотности. Последующие этапы эволюции и в этом случае включают процесс гравитационной дифференциации вещества, с той разницей, что уменьшается ее роль в начальном разделении материала ядра и оболочек.

Знание распределения по глубине скоростей распространения сейсмических волн позволяет непосредственно определить ход давления и плотности, а значит, и уравнение состояния вещества в недрах. От плотности, как мы видели, зависят два важнейших параметра, определяющих термодинамику оболочек планеты,— дебаевская температура и параметр Грюнайзена, которые легче

вычислить, располагая сейсмическими данными. Тем самым оказывается сравнительно несложным рассчитать физическую модель внутреннего строения Земли и основные термодинамические коэффициенты, характеризующие ее структуру (теплоемкость, коэффициенты теплопроводности, сжимаемости и др.). Вычисление реального хода температуры допускает, однако, заметные неопределенности. Экспериментально геотермический градиент, с которым непосредственно связан тепловой поток из недр Земли, находится лишь для самого верхнего слоя, составляя у земной поверхности в среднем величину 20°/км, с заметными вариациями на различных регионах. Но с глубиной нарастание температуры замедляется. Граничные условия здесь накладывают реальные температуры плавления веществ — тех минеральных ассоциаций, о которых мы кратко упоминали, рассказывая о модели на рис. 50. Поэтому распределение температуры вдоль кривых плавления служит своего рода критерием, определяющим положение их нижней границы.

Другим критерием служит соображение о том, что в жидком ядре температуры должны соответствовать адиабатическому закону. При таком температурном градиенте основным механизмом теплопереноса является конвекция. Конвективное состояние земных недр, захватывающее, по-видимому, не только ядро, но и мантию, сейчас по существу не подвергается сомнению. Наличием развитой конвекции в ядре обычно объясняется и большой магнитный момент Земли, как результат электромагнитной индукции в движущейся среде. Согласно уже упоминавшейся гипотезе гидромагнитного динамо, он создается движениями проводящей жидкости, которые приводят к самовозбуждению магнитного поля, подобно тому как генерируется ток и магнитное поле в динамомашине с самовозбуждением. Температура в центральной части Земли составляет по современным представлениям около 6000 К, давление 3,65 Мбар, а на границе ядра с нижней мантией 4000—5000 К и около 1,4 Мбар.

Данные о распределении скоростей сейсмических волн в теле Луны получены по результатам 8-летней работы на ее поверхности сейсмографов, которые входили в состав автономных комплексов аппаратуры «Алсеп», оставленных в нескольких районах экспедициями «Аполлонов». За этот период было зарегистрировано 2775 луно-

трясений с глубоко расположенными очагами и множество других событий, в том числе связанных с ударами метеоритов. Из приведенного числа лунотрясений около 80 отождествлены с источниками, лежащими на глубине 800—1000 км, где предполагается начало зоны частично расплавленных пород. Отмеченная периодичность глубоких лунотрясений вызвала к жизни гипотезу об их приливном происхождении. В то же время число событий, относимых за счет сравнительно неглубоко расположенных источников, за тот же период не превысило 30. Эти лунотрясения наиболее естественно связать со слабыми тектоническими процессами на Луне, что в свою

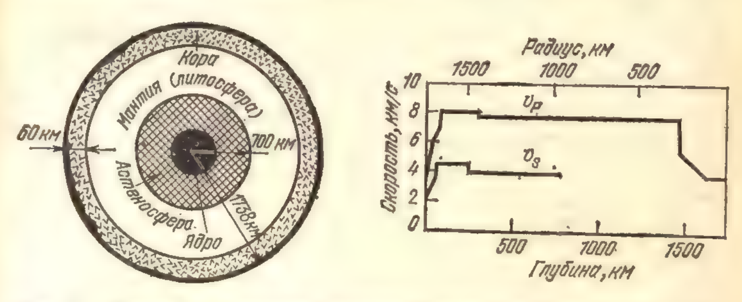


Рис. 51. Модель внутреннего строения Луны и скорость распространения продольных (v_P) и поперечных (v_S) сейсмических волн.

очередь, по-видимому, объясняется чрезвычайно медленной релаксацией напряжений, обусловливаемых сжатием и растяжением ее внешней оболочки.

О наличии значительных внутренних напряжений в лунных недрах свидетельствует факт большой неравновесности нашего естественного спутника, установленный на основе детального анализа орбит искусственных спутников Луны. Оказалось, что реальная фигура Луны, близкая к сферически равновесной, отклоняется от динамической, определяемой уровенной поверхностью ее гравитационного потенциала (селеноида). Отклонение почти на порядок больше, чем у Земли, у которой оно порядка квадрата сжатия α. При меньшем, чем на Земле, ускорении силы тяжести это приводит к сопоставимым с земными касательным напряжениям, которые должна выдерживать лунная литосфера. Другим важным результатом, полученным из исследований гравитационного поля Луны, является определение ее без-

размерного момента инерции, $I=0{,}391$, который, как видим, очень близок к значению, соответствующему моменту инерции однородной сферы. Это означает, что плотность Луны примерно постоянна, т. е. в отличие от Земли нет большой концентрации масс в центре.

Внутреннюю современную структуру Луны, определенную по данным сейсмологии (рис. 51), можно уподобить фотографическому снимку раннего этапа эволюции Земли. Самый верхний слой представлен корой, толщина которой, определенная только в районах котловин, составляет 60 км. Весьма вероятно, что на обширных материковых площадях обратной стороны Луны кора приблизительно в полтора раза мощнее.

Кора сложена уже хорошо нам известными изверженными кристаллическими горными породами — базальтами. Однако по своему минералогическому составу базальты материковых и морских районов имеют заметные отличия. Если наиболее древние материковые районы Луны преимущественно образованы светлой горной породой — анортозитами, почти целиком состоящими из среднего или основного плагиоклаза, с небольшими примесями пироксена, оливина, магнетита, титаномагнетита и др., то кристаллические породы лунных морей, подобно земным базальтам, сложены в основном плагиоклазами и моноклинными пироксенами (авгитами). Они образовались в результате охлаждения на лунной поверхности или вблизи нее, т. е. являются вулканическими породами. В то же время по сравнению с земными базальтами лунные базальты менее окислены, а это означает, что они кристаллизовались с меньшим отношением кислорода к металлу. У них, кроме того, наблюдается меньшее содержание некоторых летучих элементов и одновременно обогащенность многими тугоплавкими элементами по сравнению с земными породами. За счет примесей оливинов и особенно ильменита районы морей выглядят более темными, а плотность слагающих их пород выше, чем на материках.

Под корой расположена мантия, в которой, подобно земной, можно выделить верхнюю, среднюю и нижнюю. Толщина верхней мантии около 250 км, а средней примерно 500 км, и ее граница с нижней мантией расположена на глубине около 1000 км. До этого уровня скорости поперечных волн почти постоянны, и вещество недр находится в твердом состоянии, представляя собой

мощную и относительно холодную литосферу. Из-за большой протяженности литосферы, вещество которой сильно обеднено летучими, Луна обладает высокой добротностью Q, поэтому возбуждаемые сейсмические колебания (например, при падении метеорита на лунную поверхность) долго не затухают — говорят, что Луна «звенит, как колокол».

Состав верхней мантии предположительно оливин-пироксеновый, а на большей глубине присутствуют шпинель и встречающийся в ультраосновных щелочных породах минерал мелилит. На границе с нижней мантией температуры приближаются к температурам плавления, отсюда начинается сильное поглощение сейсмических волн. Эта область представляет собой лунную астеносферу. В самом центре, по-видимому, находится небольшое жидкое ядро радиусом менее 350 км, через которое не проходят поперечные волны. Ядро может быть железо-сульфидным, либо железным; в этом последнем случае оно должно быть меньше, что лучше согласуется с оценками распределения плотности по глубине. Его масса, очевидно, не превышает 2% от массы всей Луны.

СТРОЕНИЕ И ТЕПЛОВАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

В отличие от Земли и Луны, для других планет сейсмические данные пока недоступны. Поэтому построение моделей их внутреннего строения связано с гораздо большими неопределенностями. Основные трудности касаются определения уравнения состояния вещества, отвечающего реальному изменению плотности с глубиной, и хода температуры, отвечающего принятому минералогическому составу с учетом соответствующих кривых плавления. При этом конкретная реализация процессов, приводящих к разделению на силикатную оболочку и тяжелое плотное ядро, а также определение природы ядра существенно зависят от относительных первоначальных обилий элементов и исходных химико-минералогических комплексов. Сохраняющиеся здесь неопределенности особенно остро проявляются при создании моделей, в рамках которых делаются попытки проследить тепловую историю Земли и ее ближайших соседей.

По существующим воззрениям дифференциация слагающего вещества начинается уже на стадии аккумуляции планеты земного типа или непосредственно после ее завершения под воздействием главным образом гравитационной энергии аккреции и энергии радиоактивного распада. Из других источников разогрева важную роль на начальной фазе могли также играть приливная диссипация, выделение тепла при адиабатическом сжатии внутренних слоев и ударах формирующих планету тел, лучистая и корпускулярная энергия Солнца, джоулево тепло. Пути эволюции земных планет, включавшие глобальный процесс разделения на оболочки, были, однако, различны и зависели прежде всего от размера тела, что определило существующие структуру и тепловое состояние их недр. Различные аспекты общей проблемы внутреннего строения, химической и тепловой эволюции Земли, Луны и планет рассматривались советскими учеными Б. Ю. Левиным, В. С. Сафроновым, Е. А. Любимовой, С. В. Маевой, Г. В. Войткевичем, В. Н. Жарковым и их сотрудниками, а также многими зарубежными исследователями. Подробный анализ отдельных вопросов содержится в работах этих авторов, а также в сборнике «Космохимия Луны и планет» (см. список литературы в конце книги).

Ход эволюции определяется балансом между интенсивностью выделения термической энергии (с учетом теплоты плавления) и охлаждения за счет конвекции и теплопроводности. Одним из основных источников энергии служит радиогенное тепло, генерируемое относящимися к группе литофильных элементов долгоживущими изотопами урана, тория и калия: ^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th, ^{40}K. При моделировании термической эволюции планеты обычно исходят из начального содержания этих элементов, отвечающих тем или иным моделям конденсации протопланетной туманности. Наиболее точные количественные критерии установлены для Земли, Луны и метеоритов, для которых отношения тугоплавких литофильных элементов урана и тория примерно одинаково ($\approx 3,5$), в то время как в относительных содержаниях калия наблюдаются большие различия. Наибольшее отношение K/U ($\approx 8 \cdot 10^4$) у углистых хондритов (близких по своему составу, как мы видели, к средним обилиям элементов на Солнце) примерно на порядок меньше для земных пород и еще на полпорядка меньше для

пород Луны. Последнее хорошо согласуется с общим обеднением летучими и другими халькофильными элементами лунного вещества, доставленного на Землю автоматическими станциями «Луна» и экспедициями «Аполлон», которое по составу значительно ближе к ахондритам.

В то же время в нем обнаружено избыточное содержание урана и других тугоплавких литофильных элементов, что служит указанием на конденсацию вещества Луны из высокотемпературной фракции протопланетной туманности и остро ставит вопрос о месте формирования Луны в Солнечной системе. Именно это обстоятельство вызвало к жизни предположение о начальном образовании Луны внутри орбиты Меркурия и переходе ее из-за возникших затем приливных возмущений на более далекую орбиту, с последующим причаливанием к Земле. Хотя этому противоречит малая средняя плотность Луны, тем не менее, принимая во внимание измеренную величину теплового потока из лунных недр (с учетом ее массы), приходится допустить, что по обогащенности радиоактивными источниками тепла вещество Луны превосходит вещество Земли. Содержание их оказывается примерно аналогичным содержанию, требуемому для модели тепловой эволюции Меркурия. Что касается других планет, то начальные обилия долгоживущих радиоактивных изотопов для Венеры предполагаются близкими к земным, а для Марса — промежуточными между земными и хондритовыми.

Важную роль на самом раннем этапе эволюции первичного вещества Земли и планет могли играть также короткоживущие радиоактивные изотопы, в первую очередь изотопы алюминия ^{26}Al, а также берилия ^{10}Be, иода ^{129}I, хлора ^{36}Cl и некоторых трансурановых элементов — плутония ^{244}Pu, кюрия ^{247}Cm. Поскольку у ^{26}Al и большинства других изотопов период полураспада составляет не более 1—10 млн. лет, все эти изотопы считаются вымершими. Однако они, по-видимому, способствовали быстрому разогреву сконденсировавшихся крупных метеорных тел и протопланет, сильно ускорив начало процесса их химической дифференциации, что, кстати, объясняет близость возрастов различных по составу метеоритов. В отличие от изотопов тяжелых элементов, образование которых обусловлено процессами ядерного синтеза, легкие изотопы (^{26}Al, ^{10}Be), как отмечалось, видимо,

являются продуктами взрыва сверхновой звезды или облучения протопланетной туманности интенсивным корпускулярным излучением молодого Солнца. В незначительном количестве эти изотопы возникают и в настоящее время под действием солнечных космических лучей в материале поверхности пород Луны и метеоритов, а также в атмосфере Земли.

Выделение радиогенного тепла долгоживущими изотопами за всю историю Земли составило по оценкам Е. А. Любимовой $0{,}9 \cdot 10^{38}$ эрг, в то время как суммарные потери за счет теплового потока при его современной средней величине ≈ 60 эрг$\cdot$см$^{-2}$ с$^{-1}$, или $1{,}43 \cdot 10^{-6}$ кал$\cdot$см$^{-2}$ с$^{-1}$, не превысили бы $0{,}43 \cdot 10^{38}$ эрг. Однако в процессе тепловой эволюции поток мог меняться, и поэтому считают, что более реальная величина суммарных тепловых потерь за счет излучения в космос почти вдвое больше. Выделение радиогенного тепла короткоживущими изотопами было наиболее эффективно, как отмечалось, на стадии формирования планетезималей, и при небольших размерах тел оно должно было быстро излучаться в окружающее пространство. В сформировавшейся планете наиболее интенсивное тепловыделение, очевидно, обусловлено высвобождением потенциальной энергии в процессе гравитационной дифференциации слагающего вещества. В книге А. С. Монина по истории Земли (см. список литературы) приведена кажущаяся нам более реальной оценка тепловыделения внутри Земли вместе с энергией гравитационной дифференциации за 4,6 млрд. лет около $2{,}5 \cdot 10^{38}$ эрг. Следовательно, принимая во внимание тепловые потери, приблизительно $1{,}8 \cdot 10^{38}$ эрг накопленного тепла привели к разогреву и плавлению земных недр. Плавление было достигнуто только в области ядра, поскольку для полного расплавления на всех уровнях потребовалось бы почти вдвое больше энергии (около $3{,}2 \cdot 10^{38}$ эрг) и, следовательно, Земля не проходила такой стадии. Отсюда можно прийти к выводу, что средняя по массе начальная температура земных недр не превосходила 1400 °С, а на самом деле, вероятно, была на 300—400° ниже.

Выделение тепла должно сопровождаться теплообменом и охлаждением. Как и у гигантов, коэффициент теплопроводности внешних оболочек планет земной группы мал, поэтому выравнивание температур таким путем происходит крайне медленно и малоэффективно. Глав-

ным механизмом переноса тепла, определяющим интенсивность охлаждения планетных недр, является конвекция. С наличием конвективного перемешивания и отводом наружу тепла из глубины связана и так называемая зонная плавка (известная в технике также как зонная перекристаллизация, применяемая при рафинировании материалов), подробно изучавшаяся А. П. Виноградовым и его сотрудниками на веществе хондритов применительно к дифференцированию вещества земной мантии. Математическая модель эволюции зон плавления в термической истории Земли была рассмотрена А. Н. Тихоновым, Е. А. Любимовой и В. К. Власовым при заданной зависимости от времени и глубины распределения тепловых источников и коэффициентов теплопроводности. При этом была показана принципиальная осуществимость последовательного многократного (до 18 раз) образования зон расплава в верхней мантии с интервалами в 100—170 млн. лет, хорошо совпадающими с промежутками времени между тектоно-магматическими эпохами.

В свете современных космохимических и геофизических данных гипотеза зонной плавки не разделяется многими исследователями. Вместе с тем ясно, что поскольку к росту давления особенно чувствительна температура плавления силикатов, а не железа, для их плавления должна существовать некоторая оптимальная глубина, вероятнее всего в области средней и верхней мантии. На этой глубине должно начинаться расплавление материала хондритового состава, с дрейфом легкой и тяжелой фракций в противоположных направлениях, соответственно к поверхности и к центру. В этом многоэтапном процессе, охватывающем практически все горизонты, завершается формирование ядра и одновременно формируются литосфера и астеносфера планеты. Поскольку относящиеся к группе литофильных элементов долгоживущие изотопы урана, тория и калия обладают сродством с силикатами, т. е. способностью замещать атомы в кристаллических решетках, построенных кремнеземом SiO_2, при гравитационной дифференциации они вместе с силикатами дрейфуют наверх. Поэтому они главным образом накапливаются в основных породах коры, а с переходом к ультраосновным, наименее кислым, породам мантии содержание их резко падает. Тепло, генерируемое этими радиоактивными изотопами, очевидно

отводится путем излучения с поверхности, в основном формируя наблюдаемый тепловой поток, и почти не расходуется на нагревание материала, находящегося на большой глубине. Отсюда следует, что, чем больше величина теплового потока, тем больше степень произошедшей дифференциации недр.

Горизонтальные движения вещества мантии на вершинах образующихся крупномасштабных конвективных ячеек могут вызывать перемещения отдельных частей литосферы (жестких литосферных плит), как это предполагается для Земли в рамках гипотезы новой глобальной тектоники. Согласно этой концепции границами литосферных плит служат тектонические разрывы по осевым линиям сейсмических поясов Земли, а сами смежные плиты испытывают друг относительно друга горизонтальные смещения (сдвиги, раздвиги и поддвиги) вследствие подкоровых течений в мантии. Зона восходящих конвективных потоков совпадает с глобальной системой срединно-океанических хребтов, а зона нисходящих потоков — с системой глубоководных желобов периферии Тихого океана. В местах раздвигов, где образуются рифты, происходит формирование коры океанического типа, образуются протрузии глубинных ультраосновных мантийных пород. В местах поддвигов, сопряженных с областями островных дуг, происходит пододвигание одной плиты под другую, подобное образованию торосов вследствие бокового давления ледяных полей. В зонах контакта океанических и материковых плит породы базальтовой коры вместе с накопленными в этих областях прогибов мощными толщами осадков погружаются на большие глубины, в область высоких давлений и температур, где происходит их вторичное переплавление и метаморфизация.

В результате образующиеся при переплавлении базальтовые магмы наращивают снизу слой коры материкового типа. С этими процессами часто связывают возникновение на участках пододвигания океанической коры под материковую так называемого геосинклинального режима, характеризующегося вполне определенной совокупностью и последовательностью интенсивных тектонических деформаций, магматической активностью и образованием прогибов и складчатых структур. Что касается других планет, то прямо связать те или иные черты рельефа их поверхности с процессами глобальной тек-

тоники плит сейчас вряд ли возможно, но равным образом нельзя полностью исключить эту гипотезу для определенных этапов тепловой эволюции.

Как мы уже отмечали, изучение проблем тепловой эволюции, вызывающих живейший интерес исследователей, в последние годы стимулируется многими особенностями запечатленной на поверхностях планет «геологической хронологии», о которых рассказывалось в

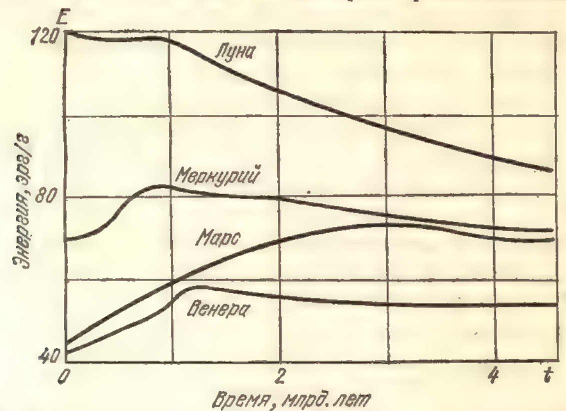


Рис. 52. Энерговыделение, отнесенное к единице массы вещества, в процессе тепловой эволюции Луны и планет земной группы.

предыдущей главе. Наряду с уточненными данными о тепловых источниках, основанными на изучении вещества Луны и метеоритов, это способствовало повышению достоверности рассчитываемых моделей внутреннего строения в отдаленные и современную эпохи. Современное состояние вопроса достаточно полно отражено в обзоре известных американских исследователей М. Токсоца и Д. Джонстона, приведенном в сборнике «Космохимия Луны и планет».

На рис. 52 показаны рассчитанные этими авторами для Луны и планет земной группы (при оговоренных выше исходных содержаниях U, Th, K) кривые тепловыделения *E* на единицу массы планеты в зависимости от времени *t*. Изменение интенсивности тепловыделения непосредственно связано с проходимой планетой эволюционной стадией. Их последовательность, примерно отвечающая раннему докембрийскому периоду в истории Земли, отчетливо проявляется на Луне по хронологии лунных пород. Эти данные позволяют прежде всего вы-

делить этап раннего вулканизма с выносом на поверхность легкой фракции расплава и образованием полевошпатовой коры около 4,6 млрд. лет назад, что привело к сглаживанию остаточных неоднородностей рельефа после завершения аккреции, и этап непрерывной магматической активности между 4,4 и 4,0 млрд. лет с образованием обогащенных алюминием и кальцием пород — анортозитов. На этом же этапе образовывались обломочные породы — брекчии, происходило частичное или полное переплавление магматических пород при падениях метеоритов и метаморфизация древней коры.

Наиболее интенсивная бомбардировка поверхности крупными метеоритными телами, очевидно, относится к этапу формирования лунных морей около 4,0—3,9 млрд. лет назад. Метеориты разрушали тонкую кору, вскрывая очаги базальтового расплава, что приводило к заполнению образовавшихся полостей и, возможно, их последующему некоторому оседанию, с образованием локальных концентраций массы — масконов. С ними связаны аномалии лунного гравитационного поля; здесь особенно велики внутренние касательные напряжения в литосфере. Асимметричное расположение лунных котловин, представляющих собой наиболее равнинные участки поверхности, можно объяснить большим сосредоточением базальтового расплава на видимой стороне Луны, а относительно более легкой и толстой коры — на обратной, где бомбардировка метеоритами приводила лишь к образованию глубоких кратеров в твердых горных породах. Следствием этого может быть и упоминавшееся ранее смещение ее центра тяжести относительно центра геометрической фигуры.

Это, по-видимому, наиболее интенсивный период лунной эволюции, которому отвечает максимум выделения энергии $E(t)$ на рис. 52, и магматическая активность наибольшего масштаба. При этом изменялось распределение по глубине тепловых источников за счет выноса силикатной магмы, обогащенной радиоизотопами литофильных элементов, к поверхности и одновременно опускание наиболее тяжелых элементов к центру. Следствием выделения радиогенного тепла и гравитационной дифференциации вещества был подъем температуры мантии и ее расплавление. Заполнение лунных морей, по всей вероятности, завершилось около 3 млрд. лет назад. Этому соответствует возраст самых молодых кри-

сталлических пород из доставленных на Землю образцов грунта, датируемых 3,16 млрд. лет. Период расплавления сменился быстрым остыванием и образованием протяженной твердой литосферы, утолщение которой по существующим оценкам происходило со скоростью около 200—300 км/млрд. лет. Соответственно отодвигалась вглубь область существования расплава в мантии, так что зона частично расплавленной астеносферы могла сохраниться в настоящее время лишь вблизи центра (см. рис. 51). Основные отличия теоретических моделей внутреннего строения Луны связаны с наличием необходимых предпосылок для формирования у Луны металлического ядра. Они зависят от исходных допущений относительно начальной концентрации радиоактивных изотопов и, следовательно, эффективности тепловых источников, и их однородного или неоднородного распределения по глубине, а также роли конвекции в переносе тепла на ранней стадии эволюции и степени затвердевания ядра вследствие остывания лунных недр. Температура в ядре зависит от его состава и, видимо, заключена в пределах 1000—1600 °С. Нижней границе отвечает предположение об обогащенности тяжелой фракции протовещества серой, преимущественно в виде сульфидов, и образовании ядра из эвтектики Fe—FeS с температурой плавления (слабо зависящей от давления) около 1000 °С. С верхней границей лучше согласуется предположение об обогащенности протовещества Луны легкими металлами (Mg, Ca, Na, Al), входящими вместе с кремнием и кислородом в состав важнейших породообразующих минералов основных и ультраосновных пород — пироксенов и оливинов.

Этому последнему предположению благоприятствует и факт пониженного содержания в Луне железа и никеля, на что определенно указывает ее низкая средняя плотность. А. П. Виноградов объяснял данное обстоятельство тем, что аккреция Луны могла угнетаться Землей. Поэтому как эти, так и десятки других сидерофильных элементов — обычных спутников металлического железа (совместно с ним присутствующих в земных породах в силу близости их физико-химических свойств) могли быть потеряны уже на ранней стадии, и при более низких температурах аккреции на Луне интенсивнее накапливались относительно более легкие элементы. Тем не менее в рамках этой гипотезы не удается найти объ-

яснение упоминавшейся ранее очевидной обогащенности лунного вещества тугоплавкими литофильными элементами, в связи с чем вопрос о месте формирования Луны — вблизи и вместе с Землей или вдали от нее — остается открытым.

Очень небольшое и возможно лишь частично расплавленное ядро позволяет понять, почему в современную эпоху Луна не имеет магнитного поля (верхний предел его напряженности не превышает 1 гаммы, или одной стотысячной доли гаусса) и соответственно почему обтекающая ее плазма солнечного ветра не испытывает возмущений. Вместе с тем установленная остаточная намагниченность лунных пород вряд ли объясняется наведенным полем при ударе метеоритов, а скорее заставляет предполагать, что либо в какой-то период своей истории Луна обладала полем внутреннего происхождения (по-видимому, обусловленного механизмом гидромагнитного динамо в существовавшем тогда расплавленном ядре), либо что формирование Луны происходило в присутствии внешнего магнитного поля напряженностью по крайней мере в несколько тысяч гамм. Последнее налагает, однако, сильные ограничения на модель термической эволюции Луны, требуя, чтобы температура в мантии всегда оставалась ниже некоторой критической температуры фазового перехода, при которой изменяется ряд физических свойств вещества (точки Кюри), равной примерно 800 °C.

При температуре выше точки Кюри вещество, содержащее ферромагнитные материалы, теряет магнитные свойства. На основе всей совокупности имеющихся данных английский селенолог С. Ранкорн рассматривает в качестве наиболее вероятной модель, согласно которой в начале своей истории Луна обладала полем напряженностью порядка 1 гаусса, но потеряла его вследствие остывания и прекращения внутренних движений приблизительно за 3,5 млрд. лет.

Существование мощной холодной литосферы, способной выдерживать напряжения, создаваемые масконами, естественным образом объясняет причину того, что в современную эпоху Луна тектонически малоактивна. Предельная величина высвобождаемой сейсмической энергии (при очагах активности на глубине 700—1200 км) по оценкам не превышает 10^{13} эрг/год, в то время как на Земле она достигает 10^{25} эрг/год.

Схожий процесс эволюции, по-видимому, прошел Меркурий, о чем свидетельствует не только ход кривой $E(t)$ на рис. 52, но и многие общие черты лунной и меркурианской топографии. Здесь, как мы видели, сохранились уникальные примеры наиболее древних структур, несильно видоизмененных последующими процессами. Вместе с тем конденсационная природа первичного вещества Меркурия иная, в основном представленная сравнительно высокотемпературной фракцией железных метеоритов. Действительно, его средняя плотность значительно выше лунной и лишь немного уступает средней плотности Земли. Последнее, однако, объясняется тем, что вещество земных недр находится при значительно большем давлении из-за разности в массах планет. Следовательно, для достижения почти такой же средней плотности Меркурий должен содержать относительно большее количество тяжелых элементов; с учетом космической распространенности важнейшим из них должно быть железо. По данным известного геохимика Г. Юри отношение Fe/Si для Меркурия приблизительно втрое больше, чем для Земли, и впятеро больше, чем для Марса. Выше уже говорилось о том, что объяснение такого резкого уменьшения содержания железа с ростом гелиоцентрического расстояния полностью укладывается в рамки конденсационной модели протопланетного вещества при наличии металл-силикатного фракционирования.

Следствием пониженного содержания силикатов является предположение о том, что в исходном веществе на орбите Меркурия было значительно меньше радиоактивных элементов по сравнению с веществом хондритовых метеоритов (по оценкам в 2,5 раза). В этом случае в рамках простейших однородных моделей при отношении $Fe/Si \approx 1{,}4$, рассчитанных С. В. Козловской, не удавалось получить температуру недр Меркурия выше 2000 °С на всех этапах эволюции, что ниже температуры солидуса (конца равновесной кристаллизации) в системе Fe—Si. Этого недостаточно для разделения на оболочки с выделением тяжелого ядра и образованием коры. В более поздних моделях, однако, принято во внимание, что на стадии конденсации первичного вещества, до удаления из газа металлического железа, Меркурий, подобно Луне, мог удержать тугоплавкие литофильные элементы и сохранить тем самым обогащенность ураном и торием, при очень небольшом содержании калия и

других летучих. С использованием этого допущения Р. Зигфрид и С. Соломон показали, что Меркурий мог дифференцироваться и образовать ядро. Процесс дифференциации произошел, по-видимому, очень рано, вскоре после завершения основной фазы аккреции, о чем свидетельствуют следы раннего вулканизма на меркурианской поверхности. Как и в рассчитывавшихся ранее моделях, принято во внимание, что на дальнейшую тепловую эволюцию планеты сильно повлияла высокая проводимость железа, составляющего около 70% ее массы. При этом оказывается, что ядро Меркурия должно было затвердеть примерно 2 млрд. лет назад, если не предполагать сохранения в нем тепловых источников вплоть до настоящего времени.

В качестве такого источника некоторые исследователи называют продолжающийся распад калия, что одновременно обеспечивает более быстрое формирование железного ядра и плавление мантии. Расчеты показали, что для сохранения ядра в частично расплавленном состоянии современное содержание калия должно быть незначительным, на несколько порядков меньше, чем в веществе лунного грунта. Дрейф к поверхности за счет процессов перемешивания мог быть не эффективным в перераспределении калия, и скорее всего его практически нет сейчас в меркурианской коре. Об этом, в частности, говорит очень низкий порог содержания в атмосфере Меркурия изотопа аргона ^{40}Ar, являющегося продуктом бета-распада ^{40}K в коре планеты, установленный по данным измерений при помощи ультрафиолетового спектрометра на космическом аппарате «Маринер-10». Этот порог оказался значительно ниже, чем измеренное содержание аргона на Луне, где он адсорбируется на грунте при низких ночных температурах, а с восходом Солнца его парциальное давление возрастает примерно на порядок величины. Подобного накопления аргона, видимо, не происходит на Меркурии, что служит серьезным ограничением при оценках содержания калия в коре, но не противоречит идее удержания его в недрах.

При условии сохранения в ядре этого или других гипотетических тепловых источников можно понять наличие у Меркурия существенного магнитного поля, исходя из представлений о его генерации за счет гидромагнитного динамо. Гипотеза остаточной намагниченности значительно менее вероятна, поскольку для Меркурия

еще труднее, чем для Луны, допустить, что температура в его недрах не поднималась выше точки Кюри. Магнитное поле зарегистрировано Н. Нессом и его сотрудниками при пролетах около планеты космического аппарата «Маринер-10». Напряженность основной дипольной составляющей поля у поверхности на экваторе составляет 350 гамм, или 1% от земного, ось магнитного диполя образует с осью орбиты угол 12°. Плазменные измерения вблизи Меркурия подтверждают, что поле принадлежит само́й планете, а не индуцировано при натекании солнечного ветра: об этом свидетельствует структура ограниченной области пространства — магнитосферы и ряд специфических особенностей обтекания планеты с собственным регулярным полем. К ним относят наличие магнитопаузы, ударной волны (образованной на расстоянии ≈1500 км от поверхности, в то время как при взаимодействии с очень разреженной атмосферой она бы оказалась примерно на порядок ближе) и ряд эффектов, которые по аналогии с Землей, очевидно, обусловлены процессами ускорения захваченных частиц в области магнитного шлейфа.

Итак, независимо от используемой тепловой модели можно утверждать, что Меркурий, подобно Луне (хотя и несколько позже), прошел вершину эволюции в ранний период своей истории и в настоящее время продолжает остывать. Как видно из рис. 53, на котором сопоставлены модели основных оболочек планет, железо-никелевое ядро Меркурия составляет около 3/4 его диаметра, т. е. примерно равно размеру Луны, и, скорее всего, является частично расплавленным. Оно окружено тонкой мантией, вероятно, состоящей из магнезиальных силикатных пород типа оливинов, и вместе с верхним коровым слоем образует твердую литосферу Меркурия. Толщина ее увеличилась от ≈200 км около 3 млрд. лет назад до ≈500 км в настоящее время. Довольно большая мощность литосферы дает основание предполагать низкий уровень современной тектонической активности. Можно, однако, допустить, что вследствие более длительного периода остывания процессы глобальной тектоники и древнего вулканизма охватывали больший период меркурианской истории, чем лунной. Отсюда следует, что возраст самых молодых пород на равнинных участках планеты внутри кратеров и котловин, подвергшихся заполнению излившейся лавой, должен быть за-

метно меньше минимального возраста 3,16 млрд. лет, определенного для пород Луны.

Особенности морфологии рельефа, представленные уже обсуждавшейся нами ранее системой протяженных крутых уступов с зубчатыми очертаниями — эскарпов, позволяют считать Меркурий планетой, на которой тектонические процессы носили уникальный характер. Они были обусловлены его общим глобальным сжатием и

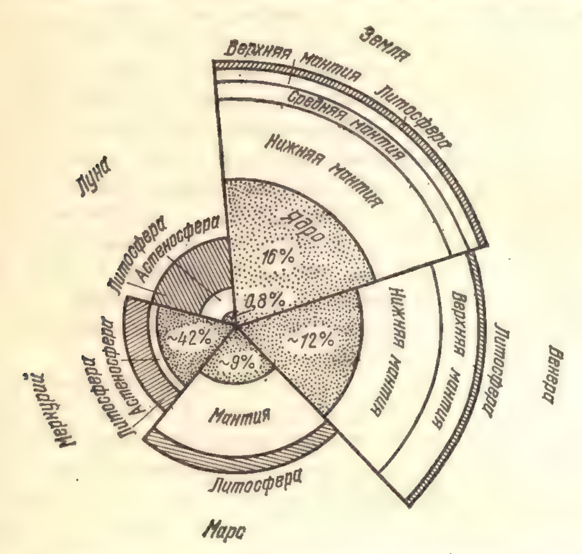


Рис. 53. Сопоставление моделей внутреннего строения планет земной группы. Относительные размеры ядер указаны в объемных процентах.

явились, по-видимому, прямым следствием формирования большого ядра спустя примерно 1,2—1,5 млрд. лет после аккумуляции планеты, сменившегося длительным периодом остывания. Охлаждение и сжатие началось вскоре после завершения периода интенсивной бомбардировки поверхности крупными метеоритами и продолжалось после формирования обширных плоских равнин и котловин, препятствуя вместе с тем проявлению поверхностного вулканизма. Возможно, что на начальной стадии этого процесса возникали тектонические трещины, однако доминирующим стало образование складчатых структур, охватывающее весь последующий период тепловой эволюции Меркурия. Они более ха-

рактерны для этой планеты, нежели следы растяжений коры тектонического происхождения на Луне и Марсе, обладающих меньшей средней плотностью.

Эволюция Венеры, видимо, в общих чертах сходна с земной и также характеризуется сравнительно ранней дифференциацией ее недр. Модели внутреннего строения рассчитываются, исходя из состава протовещества на орбите Венеры, близкого к земному, с несколько меньшей примесью летучих. Соответственно получается в целом аналогичная Земле структура недр этой планеты. Радиус жидкого железного ядра оценивается, примерно как у Земли, равным 2900 км, если допустить, что безразмерный момент инерции I Венеры эквивалентен земному. Модель на рис. 53 предполагает также, по аналогии с Землей, существование литосферы толщиной около 100 км, верхней и нижней мантий. Их минералогический состав, видимо, мало отличается от состава слагающих пород оболочек Земли. Этому утверждению не противоречат приводившиеся ранее данные определения характера грунта в местах посадки станций «Венера», которые обнаружили породы коры базальтоидного типа, среднего между толеитовыми и щелочными базальтами, а также более кислую породу, близкую к земным гранитам. Результаты этих измерений одновременно свидетельствуют и о том, что на Венере вследствие гравитационной дифференциации вещества произошел вынос в кору долгоживущих изотопов. Расчетное значение теплового потока из ее недр составляет около 100 эрг/см^2·с; примерно такие значения регистрируются на Земле в областях современного вулканизма.

Результаты анализа магнитометрических измерений, проведенных на автоматической станции «Венера-4», а в дальнейшем на искусственных спутниках «Венера-9» и «Венера-10», привели к представлениям о том, что Венера обладает очень слабым собственным магнитным полем. Его напряженность у поверхности на экваторе не превышает 10—15 гамм, или менее одной трехтысячной от напряженности поля Земли. Существование такого поля при наличии расплавленного ядра можно было бы объяснить очень малой скоростью собственного вращения Венеры. Вместе с тем принадлежность планете даже столь слабого поля пока подвергается сомнению. По данным измерений на аппарате «Пионер — Венера» собственное поле у Венеры отсутствует, а регист-

рируемые значения связаны с наведенными эффектами взаимодействия солнечной плазмы с ионосферой.

Характерные особенности геологических структур на марсианской поверхности служат хорошим критерием для рассчитываемых эволюционных моделей планеты, занимающей по своим размерам промежуточное положение между Луной и Меркурием, с одной стороны, и Землей и Венерой — с другой. Прежде всего существует ряд свидетельств того, что, подобно остальным планетам земной группы, на Марсе также происходила ранняя дифференциация вещества его недр. На это указывают сохранившиеся следы первичной магматической деятельности на отдельных наиболее древних участках поверхности, состав поверхностных пород. Однако для Марса значительно труднее удовлетворить требованию высокой начальной температуры центральных областей, с тем чтобы обеспечить их расплавление, если принять во внимание только металл-силикатное фракционирование первичного вещества, позволяющее объяснить его низкую среднюю плотность за счет общей обедненности железом. Обойти эту трудность можно, приняв также во внимание упоминавшееся ранее вероятное фракционирование железа и серы и удержание повышенного содержания халькофильных элементов при относительно низких температурах конденсации на орбите Марса. Это позволяет допустить, что образовалось ядро из смеси железа с сернистым железом в условиях сравнительно невысоких температур (около 1000°C), отвечающих эвтектике Fe—FeS. Допуская также, что калий вошел в сульфидную фазу, можно предположить, что благодаря распаду ^{40}K сохранились тепловые источники в ядре.

Поскольку значительная доля железа связывалась серой, можно думать, что мантия Марса также обогащена сернистым железом и что в составе ее силикатов больше минералов с повышенным содержанием железа, чем магния. Несомненная обогащенность железом обнаружена и в слагающем веществе поверхностных пород. Это приводит к предположению о том, что гравитационная дифференциация вещества Марса не была столь глубокой и полной, как на других планетах земной группы. Именно с этим обстоятельством — недостаточно полным выделением металлического железа — связано его повышенное содержание в марсианских породах, в то время как общее относительное содержание железа в веществе

Марса не превышает $\approx 25\%$, что существенно меньше, чем у Земли, Венеры и, конечно, Меркурия. Сильное ограничение на степень дифференциации Марса накладывает и величина безразмерного момента инерции $I = 0{,}377$, определенная с использованием данных измерений параметров орбит искусственных спутников планеты. Она указывает на сравнительно небольшое отклонение от однородного распределения плотности, что согласуется с представлениями о наличии сравнительно небольшого и не очень плотного ядра. Его радиус оценивается равным примерно 800—1400 км, масса составляет менее 6% от полной массы планеты (см. рис. 53).

В современных моделях тепловой эволюции Марса полная теплогенерация обеспечивается при отношениях долгоживущих изотопов, примерно соответствующих солнечным, и несколько повышенном содержании калия. Формирование железо-сульфидного ядра начинается вскоре после завершения аккумуляции и продолжается ≈ 1 млрд. лет, чему отвечает период раннего вулканизма. Приблизительно еще один миллиард лет спустя образуется зона частичного плавления мантийных силикатов, медленно расширяющаяся внутрь. Этот этап характеризуется интенсивной вулканической и тектонической деятельностью, образованием базальтовых равнин и вулканических щитов. На рубеже этого периода (около 3 млрд. лет назад) Марс достигает вершины своей эволюции, после чего постепенно начинает охлаждаться. В течение последующего 1 млрд. лет поддерживается примерно постоянный уровень термической энергии, происходят глобальные тектонические процессы наибольшего масштаба, образование громадных вулканов на щитах.

Сейчас Марс продолжает остывать. Тепловой поток в современную эпоху оценивается равным 40 эрг/см^2·с — приблизительно таким же, как на докембрийских щитах на Земле. Толщина литосферы, очевидно, достигает нескольких сот километров, в том числе около 100 км составляет ее верхний слой — марсианская кора. Сравнительно большая толщина литосферы дает основание предполагать умеренную сейсмическую активность Марса в настоящее время. С этими представлениями согласуются результаты экспериментов по пассивной сейсмике на посадочном аппарате «Викинг-2»: приблизительно за год работы на поверхности был зарегистрирован толь-

ко один слабый толчок с неглубоким эпицентром, вероятно, вызванный не тектоническими процессами, а падением довольно крупного метеорита в нескольких десятках километров от аппарата.

Сохранение у планеты полностью или частично расплавленного ядра подтверждают данные измерений Ш. Ш. Долгиновым и его сотрудниками магнитного поля Марса на автоматических станциях «Марс-2», «Марс-3» и «Марс-5». Эти измерения привели к выводу, что Марс обладает собственным магнитным полем, топология которого соответствует полю дипольной природы, с напряженностью у поверхности на экваторе около 65 гамм, хотя, как и в случае Венеры, этот вывод разделяется не всеми исследователями. По сравнению с Землей, это поле слабое, что при одинаковых параметрах вращения обеих планет могло бы быть следствием небольшой жидкой зоны в ядре. Если же, как полагает, например, американский космофизик К. Рассел, это поле целиком индуцированного происхождения, то даже это допущение придется отвергнуть и признать, что ядро скорее всего целиком затвердело. Нельзя, впрочем, исключить, что в своей космогонической истории Марс переживает период инверсии магнитного поля, какой, судя по палеонтологическим данным, переживала в прошлом Земля.

СОСТАВ И СТРОЕНИЕ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ

В предыдущей главе мы уделили много внимания спутникам планет-гигантов, рассказам о свойствах их поверхностей. Одновременно затрагивались проблемы внутреннего строения и эволюции их недр, ключом к решению которых служат наблюдаемые поверхностные структуры. Особый интерес представляют галилеевы спутники Юпитера, на поверхностях которых, как мы видели, обнаружен целый ряд уникальных особенностей, а средняя плотность падает с ростом расстояния от Юпитера от 3,53 г/см^3 для Ио до 1,79 г/см^3 для Каллисто (см. табл. 2). Изменение плотности естественно отражает различия в составе слагающих эти спутники пород. Расчетные модели их внутренней структуры еще до полетов космических аппаратов «Вояджер» привели к представлениям о том, что Ио и Европа почти целиком состоят из вещества горных пород, в то время как у Ганимеда и Каллисто из них сложены только центральные части

(ядра), а внешние оболочки образованы водяным или водно-аммонийным льдом. Нужно сказать, что эти предположения в своих основных чертах оправдались, но, конечно, сейчас мы узнали об этих небесных телах несравненно больше.

В первую очередь это касается спутника Ио, о котором думали, что он потерял воду в отдаленную эпоху вследствие максимального разогрева за счет радиогенного тепла в его недрах, сложенных силикатными породами. Действительно, для тела таких размеров, как Ио, любой реально допустимый запас долгоживущих радиоизотопов должен был исчерпаться в сравнительно ранний период тепловой эволюции; на других галилеевых спутниках роль внутренних источников тепла также неэффективна. Тем удивительнее было обнаружение на Ио исключительно сильной вулканической активности в современную эпоху. На ее вероятный источник указали известный американский планетолог С. Пил и его сотрудники, опубликовавшие свою работу буквально за несколько месяцев до пролета первого «Вояджера»! Сейчас это предположение, подкрепленное экспериментальными фактами, кажется наиболее правдоподобным. Причиной вулканической деятельности на Ио следует, очевидно, считать приливный разогрев его недр. Дело в том, что под влиянием притяжения Европы и Ганимеда возникают возмущения эксцентриситета синхронной орбиты Ио вокруг Юпитера, что вызывает изменения амплитуды постоянных крупномасштабных приливов. Расчеты показали, что энерговыделение вследствие приливной деформации этого спутника достаточно, чтобы расплавить большую часть его недр. Полагают, что в настоящее время у Ио сохранилась лишь очень тонкая твердая кора толщиной в 20—30 км, которая пульсирует вместе с приливами и отливами. Регулярно генерируемое тепло служит источником интенсивных извержений, непрерывной вулканической деятельности. Очевидно, если бы на месте Ио оказался другой объект, сложенный в основном льдом, то из-за быстрой потери легколетучих элементов от него бы очень скоро ничего не осталось. Возможно, что таким путем исчезали ледяные тела, испытавшие аналогичные эффекты вблизи Юпитера или других планет-гигантов.

Модель приливных возмущений, предложенная для Ио, предсказывает наличие небольшого разогрева так-

же для соседней с ним Европы. Количественно этот эффект должен быть примерно на порядок меньше, однако и в этом случае он достаточен для того, чтобы поддерживать внутреннюю активность ее недр. Отражением этой продолжающейся тепловой эволюции, очевидно, служит грандиозная сетка трещин на удивительно гладкой поверхности льда, обусловленная тектоническими процессами. Европа приблизительно на 20% по массе состоит из водяного льда, сосредоточенного в толстой

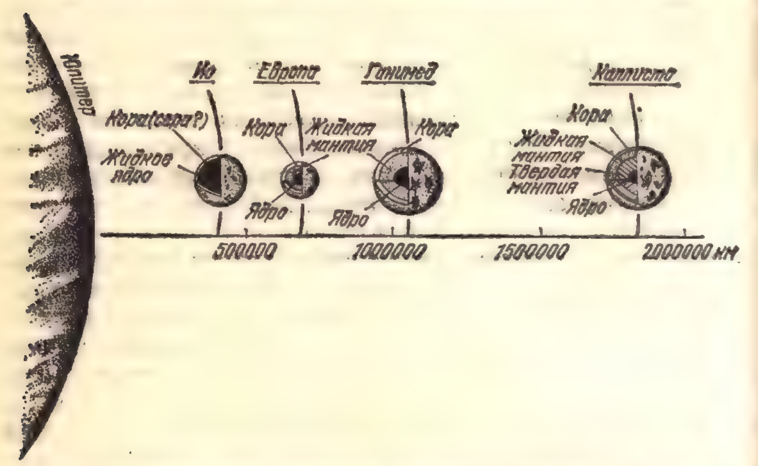


Рис. 54. Сопоставление размеров и моделей внутреннего строения галилеевых спутников Юпитера. Расстояния даны от центра планеты.

(≈100 км) коре и водно-ледяной мантии (шуге) протяженностью в несколько сот километров.

Ганимед и Каллисто, судя по близким значениям их плотности (1,9 г/см^3 и 1,8 г/см^3), уже почти на 50% состоят из водяного льда. Вместе с тем различия поверхностей этих двух тел говорят о том, что их эволюция шла различными путями, зависившими на ранней стадии от обилия радиоактивных источников разогрева. На Ганимеде, при большем содержании силикатов, они были более эффективны, что обусловило более полную дифференциацию вещества и образование менее тонкого ледяного покрова у поверхности. У Ганимеда предполагается, таким образом, несколько большее по массе, чем у Каллисто, силикатное ядро, водно-ледяная мантия (возможно со слабыми внутренними конвективными движениями) и ледяная кора. В то же время Каллисто, види-

мо, обладает наиболее толстой ледяной корой и содержит наибольшее количество воды среди всех галилеевых спутников, причем в его водно-ледяной мантии, вероятно, сохранились значительные включения скальных пород. Предполагаемые модели внутреннего строения галилеевых спутников показаны на рис. 54.

О внутреннем строении других спутников гигантов известно еще меньше. Более или менее обоснованные предположения опираются на спектрофотометрические характеристики их поверхностей, хотя эти сведения, к сожалению, довольно ограничены. Теоретические модели внутреннего строения строились Д. Льюисом, исходя из допущений о равновесной или неравновесной конденсации вещества протопланетной туманности. Было показано, что при температурах конденсации ниже 160°К образуются тела, состоящие из вещества углистых хондритов и водяного льда примерно в равном соотношении, если процесс аккумуляции протекает настолько медленно, чтобы поддерживалось химическое равновесие с окружающим газом. В случае же быстрой конденсации условия равновесия не обеспечиваются и образуются отдельные слои, химически не взаимодействующие друг с другом. Такое тело будет иметь ядро, обладающее наибольшей плотностью и окруженное мантией, состоящей из водяного льда и аммонийных гидросульфидов, а также кору из аммонийного льда. В обоих вариантах аккумуляции плотность образующихся тел оказывается приблизительно одинаковой, не сильно отличающейся от плотности водяного льда. Для больших тел, таких, как Титан, предполагаемая плотность выше (1,5—1,9 г/см^3) за счет несколько большей фракции силикатов в слагающем их веществе.

От состава должен непосредственно зависеть и ход тепловой эволюции твердых тел во внешних областях Солнечной системы, что предопределяется различной температурой плавления слагающих их льдов. Расчеты показали, что тела, состоящие из вещества углистых хондритов и водяного льда, будут проходить стадию расплавления и медленной дифференциации только при условии, если их радиус превышает 1000 км. Если же в состав слагающего вещества входят аммонийные соединения, расплавление будет иметь место и для тел меньших размеров. Поэтому, если радиус таких спутников не менее 700 км, они будут дифференцироваться с вы-

делением силикатного ядра, мантии, состоящей из водяного и растворов водно-аммонийного льда, и ледяной коры толщиной в несколько сот километров. Здесь можно усмотреть определенную аналогию с Ганимедом и Каллисто, исключая примесь аммонийных соединений. В целом такая структура, видимо, более характерна для сопоставимого с ними по размерам Титана. Можно предполагать, что у таких крупных тел происходит более полное расплавление вследствие выделения гравитационной энергии дифференциации.

К таким телам непосредственно примыкает и Плутон, на котором, вероятно, происходили менее активные процессы. В рамках моделей равновесной конденсации из протопланетной туманности при температуре около 40 К это тело, очевидно, аккумулировалось преимущественно из метанового льда, и слагающее его вещество не претерпело в дальнейшем заметной дифференциации. Другая возможность — формирование из гидратов метана ($CH_4 \cdot 8H_2O$) при температурах конденсации $\approx$70 К, с последующим их разложением в процессе внутренней эволюции, дегазацией CH_4 и образованием метанового льда на поверхности. Отождествление его в спектре отражения Плутона благоприятствует обеим этим моделям, не позволяя, однако, сделать между ними выбор. При этом для любой из них средняя плотность планеты оказывается не выше 1,2 г/см^3, а альбедо не менее 0,4, что соответственно уменьшает вероятный диаметр Плутона до размеров Луны, а массу ограничивает несколькими тысячными долями от массы Земли. Эти величины, сильно отличающиеся от обычно использовавшихся ранее, приведены в табл. 1.

До чего эти звезды изветливы:
Все им нужно глядеть — для чего?
В осужденьи судьи и свидетеля
В океан, без окна вещество.

О. Мандельштам, 1937

Мир призраков колеблет атмосферу...

Н. Заболоцкий, 1946

Глава V. ПЛАНЕТНЫЕ АТМОСФЕРЫ

Атмосфера представляет собой самую внешнюю, и потому наиболее доступную дистанционным методам исследований, оболочку планеты, формирование которой непосредственно связано с ее эволюцией. Химический состав, структура и динамика атмосферы определяются положением планеты в Солнечной системе (исходной химической дифференциацией первичного вещества и условиями инсоляции), ее массой и параметрами движения. Поэтому даже в пределах относительно небольших расстояний, занимаемых планетами земной группы, свойства их атмосфер существенно отличаются друг от друга. Большие различия в химическом составе газовых оболочек служат отражением закономерности конденсационной и эволюционной последовательностей, пройденных выделившимся из протопланетной туманности первичным веществом и планетой в целом. В конечном итоге образовались окислительные атмосферы земных планет, восстановительные атмосферы планет-гигантов и даже «сульфидная» атмосфера у Ио.

Среди земной группы планет атмосферами обладают лишь Земля, Венера и Марс. Меркурий, как и Луна, практически лишен газовой оболочки. Давление атмосферы у поверхности Венеры на два порядка больше, а у поверхности Марса на два порядка меньше, чем у поверхности Земли. Температура у поверхности Венеры достигает почти 500°С, в то время как у поверхности Марса средняя температура —50°С. Преобладающие компоненты в атмосфере Земли — азот и кислород, в

атмосферах Венеры и Марса — углекислый газ, относительное объемное содержание которого на обеих планетах свыше 95%, а атмосферы планет-гигантов в основном водородно-гелиевые.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ И СОСТАВ АТМОСФЕР ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

Еще совсем недавно, менее 10 лет назад, наши сведения об атмосферах даже соседних планет были весьма ограниченными. Достаточно, например, сказать, что оценки ожидаемого давления у поверхности Венеры различались в несколько сот раз, не было однозначного истолкования природы впервые обнаруженной радиоастрономами в 1956 г. высокой радиояркостной температуры этой планеты. Допускалось, что причиной ее может быть либо горячая поверхность, либо (при сравнительно холодной поверхности) «горячая» верхняя атмосфера, в которой содержится большое количество заряженных частиц, образующих сверхплотную ионосферу и являющихся источником интенсивного (высокотемпературного) излучения в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн. Наблюдения в обычные телескопы позволяли получить оценки атмосферных параметров только на уровне верхней границы облаков, постоянно закрывающих Венеру, и потому были бессильны дать ответ на вопросы о том, насколько глубоко под ними находится поверхность, каковы там температура и давление, из каких основных газов состоит атмосфера. Давление у поверхности Марса по данным фотометрических и поляриметрических измерений с Земли вначале оценивалось приблизительно в 100 мб, или около 0,1 атм, но затем эта оценка была уменьшена в несколько раз, в сторону более реального значения 5—10 мб, определенного радиофизическим методом при пролете в 1965 г. около Марса космического аппарата «Маринер-4». Не исключалось существование атмосферы, соизмеримой по плотности с марсианской, у Меркурия. На такую возможность указывалось еще в начале 70-х годов по результатам наблюдений характера ослабления света звезды при покрытии ее планетой.

Все эти неопределенности в оценках атмосферных параметров по данным наземных измерений связаны с трудностью истолкования наблюдательных данных при

использовании идеализированных моделей отражения и рассеяния солнечной радиации в видимой и инфракрасной областях спектра, незнании вклада истинного поглощения, свойств обычно присутствующей в атмосфере аэрозольной компоненты, влияние которой становится определяющим при наличии облаков. В спектральном методе к экспериментальным ошибкам, обусловливаемым перекрытием соседних линий, добавляется влияние теллурических полос поглощения, образующихся вследствие поглощения света молекулами газов земной атмосферы, сложная зависимость формирующихся линий и полос от температуры и давления и т. д. Не случайно поэтому столь важную и эффективную роль в исследованиях структуры, состава и динамики планетных атмосфер сыграли полеты космических аппаратов. Автоматические станции «Венера» произвели первые прямые измерения в атмосфере и на поверхности Венеры, а в дальнейшем обширный комплекс атмосферных исследований на ее ночной и дневной сторонах. Эти исследования были открыты историческим полетом «Венеры-4» в 1967 г. Прямые измерения в атмосфере Марса были проведены станциями «Марс-6», «Викинг-1 и 2». Атмосферы этих планет многократно исследовались также путем анализа их влияния на прохождение излучаемых космическим аппаратом радиоволн, по так называемому методу радиозахода. Такие эксперименты проводились на пролетных аппаратах и на искусственных спутниках Венеры и Марса. Аналогичные измерения проведены при пролетах около Меркурия «Маринера-10» и около Юпитера аппаратов «Пионер» и «Вояджер». Исследования структуры и химического состава атмосфер не только обогатили нас знаниями об их современном состоянии, но дали мощный толчок изучению общих проблем атмосферной эволюции, сравнительной метеорологии и палеоклимата планет.

Если опять вернуться к рис. 47 и сопоставить содержание на Солнце и в атмосферах планет земной группы наиболее характерных представителей группы атмофильных элементов — инертных газов, не подверженных химическим взаимодействиям и потому сохраняющих наибольшую устойчивость в процессе эволюции, то на планетах обнаруживается их резкий дефицит. Подобная же обедненность атмофильными элементами наблюдается и в веществе хондритовых метеоритов. Вместе с сообра-

жениями о последовательном характере конденсации протопланетной туманности, о чем мы подробно говорили на примере образования метеоритов различных классов, это приводит к достаточно определенной отправной концепции относительно формирования планетных атмосфер. В основе ее лежит предположение о том, что, в отличие от гигантов, первичные атмосферы планет земной группы, представлявшие собой свободную фазу летучих элементов, были потеряны уже в процессе аккумуляции или на ее завершающей стадии. Существующие же вторичные атмосферы образовались из сконденсировавшегося вещества, в котором часть летучих была химически связана или абсорбирована, и эти атмосферы формировались в процессе тепловой эволюции планет за счет дегазации из недр, главным образом путем вулканических извержений. Возможно, правда, что окончательная потеря первичных атмосфер произошла несколько позднее, в уже упоминавшийся период прохождения молодым Солнцем стадии звезд типа Т Тельца. При этом газовые оболочки ближайших планет не были ими удержаны, тогда как гиганты к этому времени были уже достаточно массивными, чтобы противостоять как выметанию, так и диссипации даже самых легколетучих элементов.

Водяной пар и углекислый газ составляют основную часть вулканических газов, состав которых зависит от условий протекания реакции (прежде всего температуры) и участвующих масс вещества мантии. Количество воды достигает приблизительно 20% от объема изливающихся базальтов. Соотношение относительных содержаний водяного пара и углекислого газа равно примерно 5 : 1. При наиболее высоких температурах в составе изверженных газов присутствуют серосодержащие и галогены, а при относительно более низких — азотсодержащие; в виде примеси присутствует водород. Свободных азота и кислорода в вулканических выбросах обычно нет, и присутствие их в атмосфере является результатом вторичных продуктов реакций с участием содержащих эти газы соединений.

Таким образом, переход указанных газов в атмосферу следует рассматривать как закономерный этап эволюции, сопровождающий радиоактивный разогрев планетных недр. Можно усмотреть вполне определенную аналогию между продуктами дегазации мантии и содержанием

летучих в веществе хондритового состава. При этом степень дегазации зависит от стадии проходимой планетой тепловой эволюции: согласно представлениям, развивавшимся в предыдущем разделе, дегазация должна быть наименее полной на Земле и Венере. Последнее подтверждается существующими оценками содержания летучих в мантии Земли, по отношению к которым отогнанные газы и пары, сосредоточенные в гидросфере и атмосфере, составляют всего единицы и доли процента. Остальные находятся в связанном состоянии в виде окислов и гидроокислов металлов и кремния, а также соединений металлов с азотом, углеродом, серой (нитридов, карбидов, сульфидов). На основе солей соответствующих кислот эти летучие образуют обширные классы природных минералов земной коры — карбонатов, нитратов, сульфатов. Вместе с тем важно подчеркнуть, что содержание основных летучих в современной гидросфере и атмосфере во много раз превышает то количество, которое могло высвободиться из минералов изверженных пород коры — это так называемый «избыток летучих», установленный еще в начале 50-х годов известным американским геохимиком В. Руби. Он наиболее близок к составу вулканических газов и с неопровержимостью лишний раз свидетельствует об определяющей роли, которую играло в дегазации вещество земных глубин.

Основные сведения о химическом составе, температуре, давлении и плотности атмосфер земных планет приведены в табл. 3. Как видим, с точки зрения дегазации из недр и «избытка летучих» состав атмосфер Венеры и Марса с преобладающим содержанием углекислоты понять легче, чем азотно-кислородный состав атмосферы Земли. Обычно предполагается, что решающее влияние на эволюцию примитивной атмосферы Земли, имевшей восстановительный характер, оказали процессы фотосинтеза под воздействием солнечной радиации, что привело к появлению в атмосфере свободного кислорода. Это в свою очередь вызвало окисление аммиака и аммонийных соединений вулканических газов и высвобождение в атмосферу свободного азота — химически неактивного газа, непосредственно не взаимодействующего с поверхностными породами и обладающего к тому же высоким порогом диссоциации (расщепления молекулы на атомы), что особенно существенно в условиях неплотной атмосферы.

Таблица 3. **Основные параметры атмосфер планет**

Планета	Земля	Меркурий	Венера	Марс	Юпитер
Химический состав (объемные проценты по отношению к средней плотности ρ)	N_2 78 O_2 21 Ar 0,93 H_2O 0,1—1 CO_2 0,03 CO 10^{-5} CH_4 10^{-4} H_2 $5\cdot10^{-5}$ Ne 10^{-3} He 10^{-4}	He $\leqslant$ 20 $H_2 \leqslant 18$ Ne $\leqslant$ 40—60 Ar $\leqslant$ 2 $CO_2 \leqslant 2$	CO_2 95 N_2 3—5 Ar 0,01 H_2O 0,01—0,1 CO $5\cdot10^{-3}$ HCl $4\cdot10^{-5}$ HF 10^{-6} $O_2 < 5\cdot10^{-1}$ SO_2 10^{-5} $H_2S < 10^{-5}$	CO_2 95 N_2 2—3 Ar 1—2 H_2O 10^{-3}—10^{-1} CO $4\cdot10^{-3}$ O_2 0,1—0,4	H_2 87 He 12,8 H_2O $1\cdot10^{-4}$ CH_4 $7\cdot10^{-2}$ NH_3 $2\cdot10^{-2}$ HCN 10^{-5} C_2H_6 $4\cdot10^{-2}$ C_2H_2 $8\cdot10^{-3}$ PH_3 $4\cdot10^{-5}$ CO $2\cdot10^{-7}$
Средняя молекулярная масса	28,97		43,2	43,5	2,25
Температура у поверхности (в средних широтах) T_{max} (K) T_{min} (K)	 310 240	 500 110	 735 735	 270 200	 135
Среднее давление у поверхности *P* (атм.)	1	$<2\cdot10^{-14}$	90	$6\cdot10^{-3}$	0,25
Средняя плотность у поверхности ρ (г/см³)	$1,27\cdot10^{-3}$	$<10^{-17}$	$61\cdot10^{-3}$	$1,2\cdot10^{-5}$	$5\cdot10^{-5}$

Фотосинтетическая природа кислорода, подкрепляемая обнаруженными органическими остатками в древнейших горных породах, приводит к представлениям, согласно которым начальным звеном на пути биологической эволюции, восходящей к глубокому архею (эре в докембрийской истории Земли около 3 млрд. лет назад), были так называемые автотрофы, представлявшие собой одну из разновидностей анаэробного брожения. В этом случае кислород мог высвобождаться за счет биохимического расщепления молекулы воды и постепенно стимулировать переход от примитивных автотрофов к более развитым формам фотосинтеза. Геологические данные дают свидетельства того, что начало окислительного метаболизма восходит к нижнему протерозою (около 2—2,5 млрд. лет назад), к которому относятся обнаруженные остатки простейших одноклеточных организмов — органелл в горных породах восточной Калифорнии, на африканском континенте и других докембрийских щитах. Они, очевидно, были предками сине-зеленых водорослей, развившихся в верхних слоях океана и положивших начало интенсивному поступлению кислорода в атмосферу благодаря лежащей в основе обмена веществ окислительно-восстановительной реакции, по которой из углекислоты и воды продуцируются углеводы и кислород.

Фотосинтетическая природа кислорода на Венере и, видимо, на Марсе исключается. По результатам масс-спектрометрических измерений на аппаратах «Викинг» кислорода в атмосфере Марса 0,13% по отношению к основной составляющей CO_2 или, в абсолютном содержании, это почти на пять порядков меньше, чем в атмосфере Земли. В атмосфере Венеры измерения при помощи масс-спектрометров и газовых хроматографов на аппаратах «Венера-11 и 12» и «Пионер-Венера» кислорода не обнаружили вплоть до значений порядка десятитысячных долей процента. Азота на Марсе 2,7%, что отвечает парциальному давлению $\approx 10^{-4}$ атм. Что касается Венеры, то еще по измерениям при помощи газоанализаторов на станциях «Венера-4, 5 и 6» был установлен предел его относительного содержания от 2 до 6%. Недавние более точные измерения дали очень хорошо совпавшее с этим пределом значение 3—5%. Это означает, что абсолютное количество азота в атмосфере Венеры превышает его содержание в земной атмосфере приблизительно

7*

в 5 раз. Поскольку, как уже говорилось, в осадочные породы азота уходит мало, а денитрификация (восстановление нитратов до молекулярного азота с участием бактерий) полностью исключается, в атмосфере Венеры, очевидно, накопился ювенильный фиксированный азот за счет более эффективной дегазации из мантии.

С учетом состава вулканических газов находит объяснение присутствие в атмосфере Венеры галогенов в виде водородных соединений хлора и фтора — «кислых дымов», которые в земных условиях обильно выделяются вместе с сернистым газом и сероводородом из вулканических кратеров, трещин на склонах вулканов (фумарол) и остывающей лавы в виде горячих газовых струй — сольфатар. В дальнейшем они вымываются из атмосферы Земли дождями, растворяются в океанах либо связываются в реакциях с твердым веществом земной коры. Большие массы этих газов образуют также гидротермальные растворы (гидротермы) подземных вод, что в условиях Венеры маловероятно. Что касается серосодержащих соединений, то, как мы увидим в дальнейшем, в их эвакуации из венерианской атмосферы основную роль играют процессы химического взаимодействия, ответственные за образование и поддержание равновесного состояния венерианских облаков.

Для подоблачной атмосферы Венеры и атмосферы Марса характерно низкое относительное содержание водяного пара, на уровне сотых и тысячных долей процента. На Венере, однако, почти в сто раз больше воды может быть в зоне облаков. На Марсе около 80% количества H_2O сосредоточено в приповерхностном слое атмосферы толщиной в несколько километров. При этом, в отличие от Венеры, содержание водяного пара в зависимости от сезона, широты и времени суток колеблется в сто раз. Наиболее сухая атмосфера — в высоких широтах зимой, а наиболее влажная — над полярными областями летом. На Марсе обнаружены также отдельные районы повышенной влажности в средних широтах и общее уменьшение влагосодержания в атмосфере в период пылевой бури.

СТРУКТУРА АТМОСФЕР СОСЕДНИХ ПЛАНЕТ

На рис. 55 показана структура атмосфер четырех планет — Венеры, Земли, Марса и Юпитера. Высота над поверхностью привязана к шкале давления, приве-

денной в центральной части рисунка в логарифмическом масштабе. При таком построении нуль высоты, соответствующий давлению у поверхности, оказывается на разных уровнях и наглядно показывает, насколько сильно атмосферы ближайших планет различаются по своей плотности. У Юпитера твердой поверхности нет, и в качестве референтного в табл. 3 принят уровень с давлением 0,25 атм. На рис. 55 приведены также профили температуры, указаны основные газовые составляющие, значения электронной концентрации на высотах, где находится ионосфера, и области расположения облаков. Модели температуры, давления и других параметров атмосфер Венеры, Марса, Юпитера почти целиком основаны на результатах измерений при помощи космических аппаратов и отражают современные представления о физических свойствах газовых оболочек этих планет. Модель атмосферы Земли, сведения о которой, естественно, наиболее полные, приведена для сравнения.

По аналогии с земной атмосферой выделены наиболее характерные области в атмосферах других планет, начиная от приповерхностной тропосферы, где формируются метеорологические процессы, до термосферы, где происходит прямое поглощение солнечной коротковолновой радиации, и самой внешней экзосферы, из которой атомы и молекулы, приобретая параболическую скорость, могут убегать в космическое пространство. Границы, отделяющие тропосферу от стратосферы и мезосферу от термосферы, соответственно носят названия тропопаузы и мезопаузы. С мезопаузой обычно отождествляется самая холодная область в атмосфере планеты. Уровень, выше которого перемешивание перестает играть доминирующую роль и основным физическим процессом, контролирующим распределение атмосферных компонент в поле силы тяжести, становится молекулярная диффузия, носит название турбопаузы (или гомопаузы). Выше него происходит гравитационно-диффузионное разделение газов, и их высотные профили устанавливаются в соответствии с молекулярным весом каждой из компонент. Быстрее всего спадают относительно тяжелые (молекулярный кислород и азот в атмосфере Земли или углекислый газ в атмосферах Венеры и Марса), а наиболее медленно — самые легкие водород и гелий; поэтому они и простираются до самых больших высот, постепенно становясь преобладающими атмосферными составляющими. Турбо-

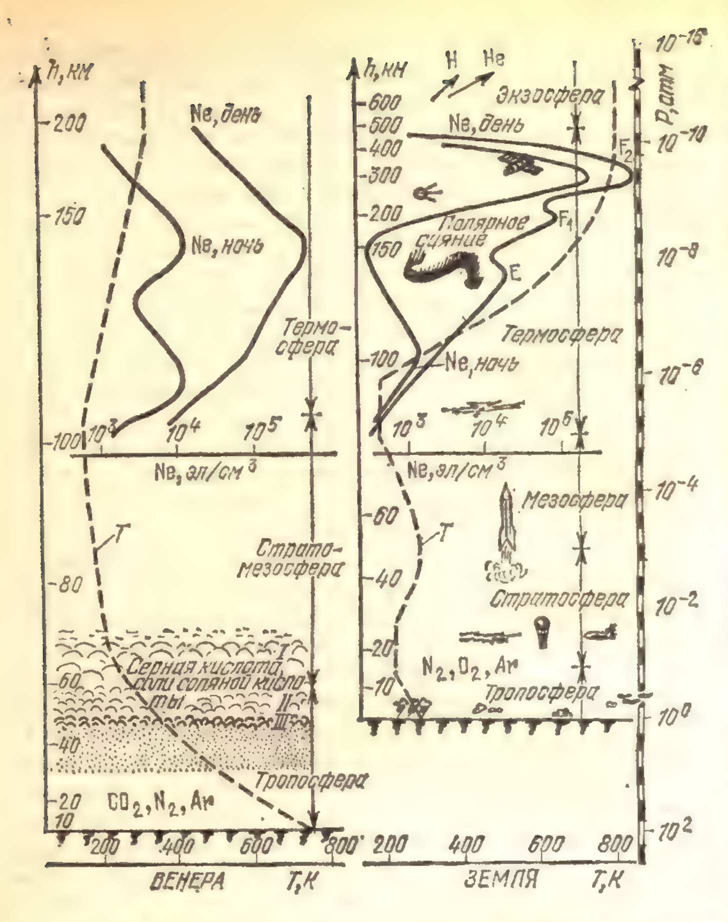
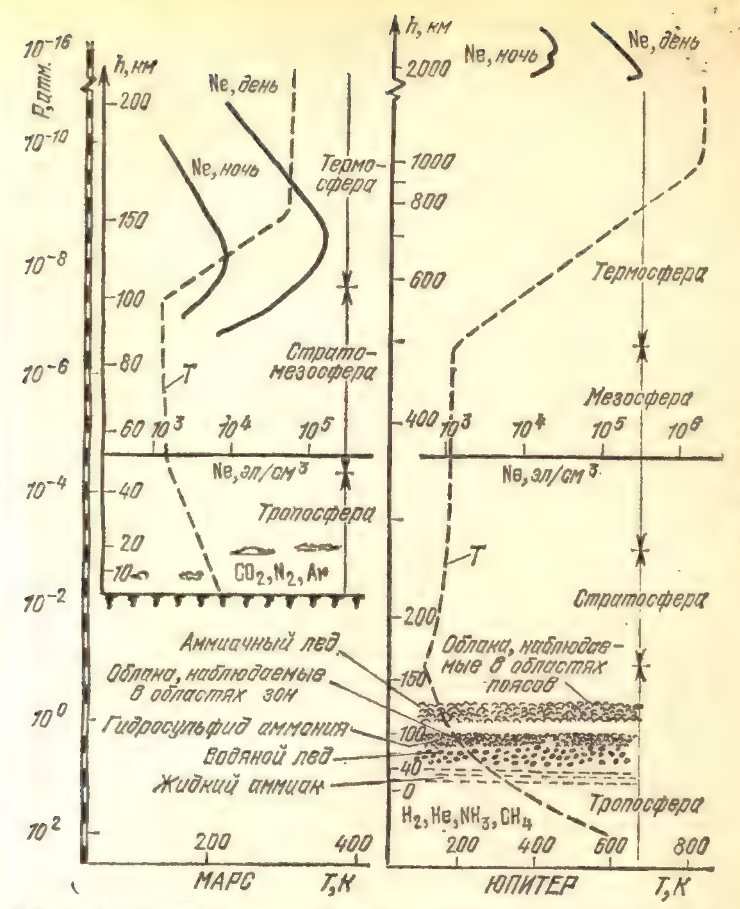


Рис. 55. Строение атмосфер Венеры, Земли, Марса и Юпитера на высота над поверхностью каждой планеты (кроме Юпитера).
тура об-

пауза в земной атмосфере расположена на высоте около 110 км.

Прямые измерения температуры и давления атмосферы Венеры, проводившиеся при участии автора на спускаемых аппаратах автоматических станций «Венера», позволили надежно определить значения температуры и давления на поверхности: 465 °С и 90 атм (на среднем уровне, соответствующем радиусу планеты 6051 км). По результатам термодинамического анализа этих изме-



В центре — шкала давления (в атм), относительно которой приведе-
Показаны профили температуры, электронной концентрации и струк-
лаков.

рений был сделан вывод о том, что до высоты приблизительно 50 км от поверхности состояние газа соответствует адиабатическому равновесию в углекислой атмосфере, что позднее подтверждено данными измерений на аппарате «Пионер-Венера». Тропосфера Венеры в несколько раз протяженнее земной — свыше 60 км. Благодаря ее огромному теплосодержанию (около 10 тыс. килокалорий над каждым квадратным сантиметром поверхности!) суточные колебания температуры пренебре-

жимо малы — менее 1°. Они становятся заметнее только в верхней части тропосферы и в стратосфере, где температурный градиент уменьшается примерно вдвое, как показали результаты радиопросвечивания атмосферы при заходе космических аппаратов за планету.

Температурный минимум (мезопауза) достигается на высоте около 100 км при температуре 160—180 К в дневное время. В этих условиях температура термосферы поднимается до 400 К, оставаясь, тем не менее, холоднее даже ночной термосферы Земли. А ночью, благодаря сильному выхолаживанию за счет инфракрасного излучения молекулами углекислого газа и интенсивной турбулентной диффузии, термосфера охлаждается почти до 100 К, как показали недавние измерения торможения искусственного спутника «Пионер-Венера». Такой контраст температур должен приводить к возникновению горизонтального переноса — сильных ветров в верхней атмосфере (термосфере) Венеры, скорости которых по крайней мере сопоставимы с наблюдаемыми скоростями до 100—200 м/с в термосфере Земли и вблизи верхней границы облачного слоя Венеры. О проблеме циркуляции и о венерианских облаках, занимающих, как видно из рис. 55, область в атмосфере толщиной около 20 км и представляющих особый интерес, мы расскажем немного позже.

В разреженной атмосфере Марса, в отличие от Венеры, тепловые неоднородности у поверхности резко выражены, и температурный профиль испытывает значительные суточно-сезонные изменения, достигающие 100—150 К. С высотой глубина вариаций сильно уменьшается. За среднее давление, примерно соответствующее среднеуровенной поверхности Марса, принято 6,1 мбар. Оно совпадает с положением тройной точки на фазовой диаграмме воды. В зависимости от рельефа давление колеблется от $\sim$2 до $\sim$10 мб. Днем температура поверхности выше, а ночью ниже, чем температура атмосферы. Как уже отмечалось, у полюсов температура атмосферы опускается зимой ниже температуры фазового перехода углекислого газа (148 К), при которой CO_2 превращается в сухой лед.

Высотный профиль температуры атмосферы Марса, показанный на рис. 55, отвечает средним условиям, т. е. относится к послеполуденному времени приэкваториальных широт. Температурный градиент днем близок к адиа-

батическому от поверхности до 20—30 км, а выше, в стратосфере, достигаются условия, близкие к изотермии, с отдельными инверсионными слоями. В стратосфере Марса, также как и на полюсах, может конденсироваться углекислота, однако марсианские облака преимущественно состоят из кристаллов водяного льда и расположены ниже, в тропосфере. Положение и температура мезопаузы на Марсе примерно такие же, как на Венере, а дневная экзосферная температура ≈ 350 К, и она испытывает меньшие вариации в зависимости от времени суток.

Как уже говорилось, наземные наблюдения не исключали возможности существования атмосферы, сравнимой по плотности с марсианской, у Меркурия. Однако, если бы давление у поверхности этой планеты составляло несколько миллибар, такая атмосфера должна была предположительно состоять из довольно тяжелых газов, чтобы противостоять диссипации, и обладать устойчивостью по отношению к диссоциации солнечным излучением. Этим критериям в принципе удовлетворяет распространенный в Солнечной системе аргон, который и назывался главным кандидатом. Что же оказалось на самом деле? Из предыдущей главы нам уже известно, что аргона практически обнаружено не было. По измерениям при помощи ультрафиолетового спектрометра на космическом аппарате «Маринер-10» резонансного свечения в характерных линиях водорода и гелия и по результатам радиозаходов за планету была получена предельная оценка давления атмосферы Меркурия $2 \cdot 10^{-11}$ мбар, или по плотности $\simeq 10^{-17}$ г/см^3. Это соответствует давлению земной атмосферы на высоте около 800 км и роднит Меркурий с Луной, обладающей почти аналогичной по плотности и составу чрезвычайно разреженной газовой оболочкой. Отсюда также следует, что к поверхности Меркурия и Луны непосредственно примыкает экзосфера, т. е. длина свободного пробега частиц значительно больше радиуса этих тел, и они легко убегают в космос.

В создании и поддержании атмосферы Меркурия, очевидно, определяющую роль играет солнечный ветер, являющийся поставщиком протонов, α-частиц и других более тяжелых элементов (Ne, C, O, N и др.). Некоторый вклад может также вносить продолжающееся высвобождение летучих из коры планеты, прежде всего гелия

за счет радиоактивного распада урана и тория. При наличии магнитосферы, создаваемой магнитным полем Меркурия, непосредственное взаимодействие плазмы солнечного ветра с поверхностью происходит главным образом в полярных областях и за счет процессов ускорения со стороны магнитного шлейфа. Этот эффект, наряду с большим различием дневных и ночных температур, приводит к заметной асимметрии меркурианской атмосферы.

Наибольшие различия экзосферных процессов на Меркурии и Луне обусловлены тем, что на Луне в несколько раз слабее солнечный ветер и потоки ионизирующего излучения, ниже дневная температура поверхности и короче сутки. Кроме того, Луна лишена магнитного поля, т. е. отсутствует магнитный барьер для достижения заряженными частицами поверхности, но одновременно она обладает почти вдвое меньшей скоростью диссипации частиц из-за разности масс этих небесных тел. Поэтому время обмена атмосферных атомов и молекул на Луне, по-видимому, несколько меньше, чем на Меркурии, и составляет для инертных газов от недели до 3-х месяцев. Предполагают также, что определенный вклад в создание лунной атмосферы может вносить микрометеоритная эрозия.

Оценки скоростей обмена для Меркурия и Луны являются, конечно, весьма приближенными, поскольку неизвестно, находятся ли основные компоненты атмосферы в состоянии насыщения с поверхностными породами, т. е. является ли процесс взаимодействия атмосферы с поверхностью равновесным, и не учитываются эффекты, обуславливаемые скоростями фотодиссоциации, фотоионизации и рекомбинации для ряда атмосферных составляющих, а также их прямое выметание солнечным ветром.

ОБЛАЧНЫЙ ПОКРОВ ВЕНЕРЫ

Среди многочисленных проблем физики Венеры одна из наиболее волнующих и интересных связана с природой ее облаков. То, что эта планета окутана облаками было известно давно: именно они препятствовали в течение столетий астрономическим наблюдениям, не позволяя увидеть поверхность и определить свойства подоблачной атмосферы. Не было никакой возможности как-то

оценить толщину облаков, внутреннюю структуру и высоту над поверхностью, поскольку наблюдениям доступна лишь их видимая с Земли верхняя граница.

Обычно считалось, что венерианские облака плотные, подобные, скажем, хорошо известным кучевым облакам на Земле. Существовало и другое мнение, что это пылевые облака, которые простираются вплоть до поверхности. Относительно природы конденсата высказывались самые разнообразные предположения, хотя водно-ледяные частицы имели, пожалуй, наибольшее число сторонников. В числе других кандидатов назывались соединения, включавшие углерод, хлор, железо и др. Ни одно из них, однако, как и наиболее привычные нам по земным стандартам облака из конденсированной влаги, не объясняли всей совокупности имевшихся экспериментальных данных. К ним, в первую очередь, относятся характеристики поглощения отраженного планетой солнечного света в отдельных участках спектра и степень его поляризации, некоторые детали спектра теплового излучения Венеры, измеренное чрезвычайно низкое содержание водяного пара над облаками, не согласующееся с температурой их верхней границы, и ряд других особенностей.

В попытках найти приемлемое отождествление спектральных данных около восьми лет назад американскими учеными Г. Силлом и супругами Л. и Э. Янг была почти одновременно выдвинута гипотеза, что облачные частицы образованы концентрированным водным раствором серной кислоты. Эта гипотеза оказалась исключительно плодотворной и за короткий срок приобрела широкую популярность, поскольку удачно объясняла также другие данные наблюдений. Более того, мельчайшие капельки серной кислоты вскоре обнаружили и в земной атмосфере, правда на больших высотах в стратосфере.

Почти одновременно были получены самые первые сведения о протяженности венерианских облаков. Автоматическая станция «Венера-8», совершившая в 1972 г. посадку на освещенной стороне Венеры, в процессе снижения измеряла, как изменяется интенсивность солнечного света (освещенность) с высотой. Для этого на ней был установлен фотометр на видимую область спектра. Были выделены три основные области в атмосфере, в пределах которых свет ослаблялся различно. Оказалось, что наибольшее ослабление происходит до высоты

49 км, в то время как в области высот между 49 и 32 км оно значительно меньше, а ниже 32 км атмосфера практически прозрачна, так как ослабление солнечного света здесь незначительно и целиком подчиняется закону молекулярного (релеевского) рассеяния в углекислом газе — основной составляющей атмосферы Венеры. Получалось, таким образом, что по мере погружения вглубь атмосферы молекулярная плотность растет, а оптическая плотность падает. Это можно было объяснить, если предположить, что основной вклад в уменьшение интенсивности солнечной радиации в двух вышележащих областях вносит не релеевское рассеяние, эффективность которого с высотой, наоборот, падает, а рассеяние на аэрозолях облаков, обладающих наибольшей плотностью выше 49 км.

Сделанные выводы оказались верными, как это стало ясно после проведения более полных измерений зависимости от высоты солнечных лучистых потоков в нескольких интервалах длин волн в видимой и ближней инфракрасной областях спектра на станциях «Венера-9 и 10» и недавно на станциях «Венера-11 и 12». Такие измерения дают, однако, лишь средние интегральные характеристики и вариации оптической плотности газовой и аэрозольной среды. Чтобы изучить структуру облаков и микрофизические свойства аэрозолей, необходимы существенно иные методы. Одним из них является нефелометрический метод (от греческого слова нефело — туман), широко используемый в земной метеорологии, а также в химии и биологии, при анализе дисперсных (мутных) сред, т. е. сред, содержащих различные взвешенные частицы. В планетных исследованиях при помощи космических аппаратов этот метод впервые был применен автором и его сотрудниками в 1975 г. на автоматических станциях «Венера-9 и 10».

В основе метода лежит измерение под разными углами интенсивности рассеянного света, создаваемого искусственным источником. По характеру рассеяния на данной длине волны, зависящему от соотношения размеров и химической природы частиц, можно с хорошей точностью определять свойства рассеивающей аэрозольной среды, подробно исследовать характеристики частиц облаков. В частности, важной определяемой характеристикой является показатель преломления, очень чувствительный к тому, из какого вещества состоят аэрозоли. Эти

важные сведения и были получены в результате проведенных экспериментов. Они были позднее полностью подтверждены измерениями при помощи нефелометров и спектрометров аэрозольных частиц на американских космических аппаратах «Пионер-Венера».

Что же мы узнали об облачном покрове Венеры? Венерианские облака оказались весьма сложным образованием, неоднородным по своей вертикальной структуре и обладающим сравнительно малой плотностью. Это скорее слабый туман, дымка, дальность видимости в которой превышает километр. Соответственно очень мала масса облачных частиц. Вместе с тем протяженность облаков по высоте достигает почти 20 километров, чем и объясняется их непрозрачность при наблюдениях с Земли даже при малой плотности. Нижняя граница облаков, в хорошем согласии с данными измерений освещенности на станциях «Венера», довольно стабильна и располагается на уровне 48—49 км, испытывая небольшие вариации по высоте и плотности.

Высота расположения и структура облаков показаны на рис. 55. Внутри облаков четко выделяются три отдельных зоны (яруса): верхняя (67—58 км), средняя (58—52 км) и нижняя (52—48 км). Каждой из них присущи свои определенные черты. Верхнюю зону в основном «населяют» мелкие сферические частицы, размером в 2—3 микрона, и они преломляют световые лучи так же, как 80-процентный раствор серной кислоты. Это хорошо согласуется с оценками, полученными из наземных наблюдений и соответственно подтверждает выдвинутую гипотезу. Число капелек здесь невелико, но больше, чем в других зонах,— от 100 до 300 в кубическом сантиметре. Средняя и нижняя зоны содержат кроме этих также и более крупные частицы размером в 5—8 микрон. Коэффициент преломления у них значительно меньше: он почти такой же, как у воды или льда, а число таких частиц меньше сотни. С учетом ряда дополнительных соображений, однако, предположение о том, что это водяные или ледяные частицы, маловероятно. Значительно более вероятной кажется гипотеза, согласно которой в среднем и нижнем ярусах облаков содержатся кристаллические частицы в виде сравнительно тонких пластинок, представляющие собой соли соляной кислоты, вероятнее всего $FeCl_2$. Показатель преломления и характер светорассеяния у таких частиц действитель-

но хорошо согласуются с наблюдавшимися значениями. Это предположение подкрепляется также данными измерений, проведенных на станции «Венера-12» при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра, согласно которым в облаках зарегистрирован хлор, причем в количестве, почти на порядок превышающем содержание в облаках серы. Последнее легко объяснимо, если принять во внимание значительно бо́льшие размеры кристаллических частиц по сравнению с каплями серной кислоты.

Нельзя полностью исключить и того, что зарегистрированный хлор находится в виде капелек соляной кислоты, также обладающих низким показателем преломления. Действительно, как показывают термодинамические модели, рассчитанные советскими геохимиками, сосуществование таких двух фаз принципиально возможно, если допустить, что важную роль в обеспечении обмена по вертикали играет динамика, включающая спектр движений различных пространственных масштабов, от макродвижений до турбулентности. Однако скорости движений должны быть при этом весьма велики, чтобы предотвратить поглощение HCl серной кислотой. Наконец, по всей толще облаков измерениями при помощи спектрометра частиц на аппарате «Пионер-Венера» выявлено присутствие мелких частиц, размером менее одного микрона. По-видимому, частицы аналогичной природы содержатся также в подоблачной и в надоблачной дымках (см. рис. 55). Надоблачная дымка простирается от верхней границы облаков примерно до высоты 80 км. К сожалению, из чего состоят эти частицы, остается пока неизвестным, но с ними вполне обоснованно связывают значительное ослабление солнечной радиации в облаках, особенно ее поглощение в ультрафиолетовой части спектра и образование ультрафиолетовых контрастов на диске планеты.

Подоблачная дымка обнаружена под основными тремя слоями облаков, до высоты 32 км над поверхностью. Наряду с мелкими, субмикронными частицами здесь, вероятно, содержится небольшое количество более крупных частиц, обладающих высоким показателем преломления, как у серы. Образование и состав этой дымки, по-видимому, генетически связан с самими облаками, у нижней границы которых при температуре около 100°C серная кислота начинает интенсивно выкипать, а

частицы серы плавятся. Заманчиво было бы предположить, что выпадающие из облаков частицы серы присутствуют здесь в виде взвеси, уподобив ее «серному дождю». Вместе с тем такое предположение трудно согласовать с измеренным на «Венере-11 и 12» В. И. Морозом и его сотрудниками очень низким пределом содержания паров серы в подоблачной атмосфере планеты.

Ниже уровня дымки и вплоть до поверхности атмосфера практически прозрачна, однако в районе высот 12—17 км и 8—12 км по измерениям на станции «Венера-11» отмечались слои с незначительным содержанием аэрозолей (1—2 частицы в кубическом сантиметре), обладающих высоким показателем преломления. Возможно, что эти слои переменны по высоте и существуют не постоянно. Несмотря на высокую плотность атмосферы Венеры, у поверхности она не запылена — этот важный вывод еще раньше был сделан на основании измеренной малой скорости ветра в районах посадки спускаемых аппаратов «Венера», а также из анализа фототелевизионных панорам.

Как образуются и сохраняют свою удивительную стабильность венерианские облака? Очевидно, важнейшую роль тут играют химия содержащих серу и хлор соединений и атмосферная динамика. Как мы уже отмечали, на Земле выбрасываемые вулканами соединения серы и «кислые дымы» преимущественно растворялись в океанах. На горячей Венере, где океанов нет, они сконденсировались в атмосфере на тех высотах, где это стало возможным по температурным условиям. Поступление этих газов в атмосферу продолжается до сих пор на Земле и, по-видимому, на родственной ей Венере. Ее облака с этой точки зрения — своего рода аналог земных океанов.

Видимо, серная кислота наиболее активно образуется в верхней части облаков под воздействием солнечного света, т. е. с участием процессов фотохимии, обеспечивающих необходимый для окисления сернистого ангидрида свободный кислород. В этих процессах могут образовываться и полимеры серы, частицы которой легко сосуществуют с серной кислотой. Таким образом, речь идет о выяснении в первую очередь характера и путей циклических превращений серы между соединениями с восстановительными (H_2S, COS, S_n) и окислительными (H_2SO_4, SO_3, SO_2) свойствами. Еще более сложная си-

туация с соляной кислотой и содержащими хлор соединениями, для которых критическим условием является необходимость сравнительно высокого содержания в облаках водяного пара. Между тем однозначного ответа на этот вопрос пока нет. С ранними измерениями А. П. Виноградова и его сотрудников при помощи газоанализаторов на станциях «Венера-4, 5 и 6» хорошо согласуются данные измерений В. Ояма и др. при помощи газового хроматографа на аппаратах «Пионер-Венера». По этим данным относительное содержание H_2O в облачном слое от 0,1 до 0,5%. В то же время уже упоминавшиеся нами спектрофотометрические измерения В. И. Мороза и др. на «Венере-11 и 12» дают почти на два порядка меньшее содержание, и по крайней мере для подоблачной атмосферы это последнее определение представляется достаточно надежным. Разрешение данного противоречия, как и необходимость прямого отождествления химической природы венерианских облаков, остаются в числе первоочередных задач дальнейших исследований этой планеты.

Изучение облаков Венеры представляет особую важность в связи с возрастающей актуальностью чисто земной проблемы защиты от загрязнений окружающей среды. С промышленными выбросами в атмосферу, приводящими к образованию туманов-смогов, связан ряд серьезных последствий — превышение предельных санитарных норм загрязнений воздушных бассейнов городов, нарушение экологического равновесия, катастрофическое воздействие на архитектурные памятники и др. Одна из причин возникновения устойчивых смогов — повышение содержания в атмосфере сернистого ангидрида с его последующим окислением и образованием капелек серной кислоты. В отличие от обычных туманов, они не исчезают на солнце, а наоборот, усиливаются благодаря фотохимическим превращениям. Венерианские облака, видимо, в целом подобны таким смогам. Поэтому необходимо понять основы физико-химических и динамических процессов в облаках, что непосредственно связано с определением с высокой точностью содержаний малых компонентов, участвующих в реакциях, соответствующих химических констант и динамических констант таких важнейших процессов, как конденсация, коагуляция и седиментация облачных частиц на разных уровнях.

С облаками Венеры связано еще одно чрезвычайно интересное явление — ее высокая грозовая активность. Она была обнаружена в экспериментах по изучению низкочастотных радиошумов в атмосфере планеты, проведенных на станциях «Венера-11 и 12» Л. В. Ксанфомалити с сотрудниками. По частоте следования импульсов, регистрировавшихся в процессе спуска аппаратов, был сделан вывод о том, что интенсивность электрических разрядов на Венере во много раз выше, чем на Земле. Это означает, что в протяженных облаках Венеры легче возникают электрические поля со средней напряженностью, достаточной для возникновения электрического разряда (порядка одного мегавольта на метр). Высокой грозовой активностью на Венере, очевидно, объясняется природа многократно наблюдавшегося слабого свечения ее ночной стороны, в результате которого становится различимым контур темного края диска на фоне неба. Это явление известно под названием «пепельного света» Венеры, и энергетически оно хорошо укладывается в рамки такого механизма.

АТМОСФЕРЫ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ

Состав и структура атмосфер планет-гигантов сильно отличается от атмосфер планет земной группы. Основные составляющие — водород и гелий, а также метан и аммиак. В атмосфере Юпитера свыше 87% по объему водорода и $\approx$13% гелия, остальные газы, включая метан, аммиак, воду, находятся в виде примесей, на уровне десятых и сотых долей процента (см. табл. 3). Примерно аналогичная ситуация в атмосфере Сатурна, в то время как в атмосферах Урана и Нептуна относительные содержания метана и аммиака значительно больше. В атмосфере Юпитера обнаружены также молекулы угарного газа, фосфина, циана и, наконец, высшие углеводороды — этан, ацетилен. Этан, очевидно, образуется в результате ультрафиолетового фотолиза метана, а ненасыщенные углеводороды — в каталитических реакциях с образованием дополнительной углеродной связи.

Существование углеводородов породило гипотезы о возможном абиогенном органическом синтезе в атмосфере Юпитера под влиянием солнечной ультрафиолетовой и высокоэнергичной корпускулярной радиации, а также

грозовых разрядов в облаках, происходящих благодаря эффективному разделению зарядов в условиях интенсивной конвекции. К. Саганом и С. Кхарой были проведены эксперименты по моделированию такого рода процессов, позволившие получить обширный класс сложных органических соединений, вплоть до аминокислот, и отождествить их спектральные характеристики в видимой и ближней инфракрасной областях длин волн со спектрами Юпитера. Возможно, что органические полимеры, обладающие широкой гаммой цветов, вносят определенный вклад в окраску Юпитера. Однако основную роль здесь, по-видимому, играют образующийся при разложении фосфина аморфный красный фосфор, водородные и аммонийные полисульфиды и сера. Они-то и окрашивают диск планеты в красно-коричневые и желтые цвета, поскольку сами основные составляющие — водород и гелий, а также метан и аммиак в любой фазе остаются практически бесцветными.

Модель верхней части газовой оболочки Юпитера на рис. 55 построена по данным измерений температуры при помощи инфракрасных радиометров и радиозатменных измерений при пролетах около Юпитера космических аппаратов «Пионер» и «Вояджер». Нуль высоты соответствует некоторому произвольно выбранному значению на шкале давления. Давлению 1 атм соответствует температура 170 К. Тропопауза находится на уровне с давлением 0,1 атм и температурой 115 К. Во всей нижележащей тропосфере высотный ход температуры можно охарактеризовать адиабатическим градиентом в водородно-гелиевой среде — около 2 К на километр. Спектр радиоизлучения Юпитера также свидетельствует об устойчивом росте радиояркостной температуры с глубиной. Выше тропопаузы расположена область температурной инверсии, где температура вплоть до давлений порядка 1 мб постепенно нарастает до ≈ 180 К. Это значение сохраняется в мезосфере, которая характеризуется почти изотермией до уровня с давлением $\approx 10^{-6}$ атм, а выше начинается термосфера, переходящая в экзосферу с температурой 1250 К.

На рис. 55 показана также предполагаемая структура облаков Юпитера. Согласно этой модели выделяется три основных слоя: самый верхний, при давлении около 0,5 атм, состоящий из кристаллического аммиака, промежуточный — из гидросульфида аммония и нижний,

при давлении в несколько атмосфер — из обычного водяного льда. Такая модель в целом удовлетворяет совокупности имеющихся экспериментальных данных и хорошо объясняет характерную окраску зон и поясов: расположенные выше в атмосфере светлые зоны содержат ярко-белые кристаллы аммиака, а расположенные глубже пояса — красно-коричневые кристаллы гидросульфида аммония. В некоторых моделях, исходя из геохимических соображений, допускается также существование самого нижнего, четвертого слоя облаков, состоящего из жидкого аммиака. Подобно Земле и Венере, в атмосфере Юпитера зарегистрированы молнии. Судя по запечатленным на фотографиях «Вояджера» световым вспышкам, интенсивность разрядов чрезвычайно велика. Пока неясно, однако, в какой мере эти явления связаны с облаками, поскольку вспышки обнаружены на бо́льших высотах, чем ожидалось.

Эффективная температура Сатурна вследствие большего расстояния от Солнца ниже, чем у Юпитера. Но в целом структура атмосферы, профили температуры и давления, плотность облачного покрова похожи на юпитерианские, хотя поверхность облаков выглядит более однородной, что, возможно, объясняется наличием протяженной надоблачной дымки (см. рис. 45 и 46). Верхняя граница облаков у экватора, по-видимому, расположена выше, чем у полюсов, и цвет их изменяется от сине-зеленоватого в приполярной зоне до коричневатого вблизи широты $\sim 50^\circ$, как это видно на изображениях, переданных аппаратом «Пионер-11». В средних и нижних широтах различаются отдельные пояса и зоны, выраженные гораздо слабее, чем на Юпитере. Зоны, по-видимому, расположены выше поясов, поскольку, как показали измерения при помощи инфракрасного радиометра, их температура ниже.

Истолкование данных наземных измерений привело к предположению о существовании выше слоя дымки поглощающих частиц, за счет которых можно было бы объяснить наблюдаемое уменьшение отражения от Сатурна в ультрафиолетовой области спектра, подобно тому как это имеет место и в надоблачной атмосфере Венеры. Однако поглощающий агент не был обнаружен «Пионером-11», а зарегистрировано интенсивное ультрафиолетовое свечение за счет рассеяния атомарным водородом, источником которого, возможно, служат кольца.

Особенности атмосфер Урана и Нептуна обусловливаются еще более низкими эффективными температурами и уже упоминавшимися значительно бóльшими концентрациями метана и аммиака. Особенно важную роль играет метан. Спектры отражения этих планет в видимой области с хорошо известными метановыми полосами поглощения почти не имеют различий. К сожалению, анализ содержания этого газа и оценки давления и температуры на уровне формирования полос сильно осложняются трудностями в определении эквивалентных ширин линий и ограниченностью лабораторных данных о полосах CH_4 в спектральном интервале короче 1,1 мкм, где поглощение имеет сложный характер. Поэтому в качестве эталона сравнения обычно используются измерения эквивалентных ширин в спектрах Юпитера и Сатурна, где содержание метана определено более надежно, с погрешностью не выше $\approx 50\%$. Согласно этим результатам на уровне формирования полос при температуре ≈ 90 K, на котором линии CH_4 еще остаются ненасыщенными, отношение смеси CH_4/H_2 существенно превышает солнечное значение, а обогащенность углеродом достигает примерно 50 раз.

Структура атмосфер Урана и Нептуна, по-видимому, также заметно отличается от Юпитера и Сатурна. На это указывают, в частности, их спектры радиоэмиссии, в которых не обнаруживается значительного возрастания яркостной температуры в области от 3 до 10 см, как это наблюдается при быстром росте температуры с глубиной. По совокупности результатов анализа спектральных наблюдений и расчетов ослабления по высоте теплового потока Р. Даниэльсоном были рассчитаны модели атмосфер этих планет. При этом использовались различные предположения относительно расположения эффективного уровня отражения солнечной радиации и границы облачного слоя, а поведение термодинамических параметров контролировалось ходом кривой давления насыщающих паров метана. Наиболее близкими к реальности, объясняющими измеренный ход яркостных температур, оказались модели, в которых допускается переменный по высоте тепловой поток и наличие в атмосфере инверсионных слоев. Предстоит еще, однако, затратить немало усилий, прежде чем сведения об атмосферах Урана и Нептуна станут значительно более определенными. Видимо, решающую роль здесь сыграет предпо-

лагаемый пролет вблизи Урана космического аппарата «Вояджер-2» в 1986 г.

По ряду сходных признаков в регистрируемых на Земле спектрах отражения к Урану и Нептуну примыкает самый большой спутник Сатурна — Титан. За последнее время его атмосфера, открытая еще в начале этого столетия испанским астрономом Комас Сола, привлекала очень большое внимание. В 40-х годах известный американский астроном Д. Койпер подтвердил наличие атмосферы на Титане, обнаружив полосы поглощения метана в его спектре, а еще позднее было сообщено об отождествлении слабых квадрупольных линий молекулярного водорода. Но такие линии возникают за счет деформации молекул при столкновениях, создающих их асимметрию и дипольный момент, что обусловливает нерезонансное (индуцированное) поглощение, пропорциональное квадрату давления газа. Это привело к предположению о наличии у Титана довольно плотной газовой оболочки.

Результаты исследования зависимости инфракрасной яркостной температуры от длины волны были вначале интерпретированы таким образом, что на длинах волн 20—30 мкм, соответствующих ожидаемой равновесной температуре Титана (около 90 К), он излучает значительно меньше энергии, чем получает от Солнца, а максимум излучения смещен в более коротковолновую часть спектра. Этот феномен можно было объяснить, если опять же допустить, что Титан обладает плотной атмосферой, в которой основная непрозрачность создается в диапазоне длин волн около 20 мкм. Тогда измеряемая на этих длинах волн температура будет относиться к излучающему слою, расположенному на определенной высоте в атмосфере, а температура у поверхности вследствие парникового эффекта может достигать почти 200 К. Другими словами, климатические условия на Титане могли бы оказаться сравнительно благоприятными, почти такими же, как на Марсе!

Длительное время дискутировался вопрос о том, какой агент может быть ответственным за требуемую непрозрачность атмосферы. Метан не обладает сильными полосами поглощения в области длиннее 7,7 мкм. Что касается молекулярного водорода, то его потребное количество должно было бы соответствовать давлению у поверхности не менее 0,5 атм, и вряд ли тело такой массы, как Титан, могло удержать столько водорода, а его постоянный

интенсивный подвод в атмосферу маловероятен. Более приемлемым казалось предположение, что уходящее излучение экранируется за счет индуцированного поглощения молекулярного водорода при давлении порядка 1 атм. Столь высокое давление могло бы создаваться, например, неоном или азотом, при относительно небольшом содержании водорода. Космически распространенный неон мог сохраниться со стадии аккумуляции, а азот образоваться за счет фотолиза аммиака.

Однако реальность этой гипотезы сильно уменьшилась, после того как сам факт обнаружения водорода в спектрах Титана был поставлен под сомнение. Поэтому продолжали рассматриваться две модели: неплотной атмосферы с давлением у поверхности ≈ 20 мб и плотной атмосферы с давлением у поверхности около 1 атм. Основным атмосферным компонентом считался метан. Между тем приемлемого объяснения возможного повышения температуры нижней атмосферы по-прежнему найдено не было.

Исходя из представлений о возможном образовании углеводородов под действием ультрафиолетового излучения на поверхности или в слое облаков, предпринимались попытки объяснить природу красноватой окраски Титана: его альбедо в красной части спектра столь же велико, как у Марса или Ио, и, вообще говоря, может обусловливаться поверхностью или атмосферой. Присутствие в спектре довольно размытых, трудно выделяемых признаков поглощения, присущих, в отличие от газов, отражению от твердых тел, казалось бы не исключает первой возможности. Однако ряд деталей отражения и результаты измерений зависимости степени поляризации от фазового угла определенно свидетельствовали о том, что, подобно Юпитеру и Сатурну, отражающий материал скорее всего является аэрозолем, сосредоточенным в облаках.

Результаты оптических и радиоизмерений параметров атмосферы Титана при пролете «Вояджера-1» существенно прояснили все эти вопросы. Оказалось, что Титан действительно обладает очень плотной атмосферой, с давлением у поверхности $\sim 1{,}5$ атм и температурой 90 К, т. е. парникового эффекта не обнаружено. На 99% атмосфера состоит из азота, а относительное содержание метана всего около 1%; есть также этан и ацетилен. Полосы последнего, формирующиеся в зоне

надоблачной дымки при $T \approx 150$ К, а не излучение приповерхностной атмосферы, обуславливают повышенную яркость на длинах волн 8—10 мкм. Облака плотной пеленой закрывают Титан и не дают возможности увидеть его поверхность; они состоят почти целиком из жидкого метана. Интересно заметить, что при сопоставимых значениях поверхностного давления атмосфера Титана почти вдесятеро массивнее земной, что объясняется различием ускорений силы тяжести на этих двух небесных телах.

Очень немного пока есть данных для того, чтобы ответить на вопрос, обладает ли атмосферой Плутон. Спектральные и спектрофотометрические измерения не показали следов поглощения метана в газовой фазе (который мог бы находиться в виде насыщающих паров в равновесии с поверхностным льдом) или каких-либо других атмосферных составляющих. Естественным образом это можно объяснить чрезвычайно низкой температурой на поверхности Плутона, которая ниже температуры конденсации большинства газов. Пожалуй, единственный газ, который мог быть удержан на теле столь малой массы и не испытать конденсации,— это неон. Однако это предположение маловероятно, поскольку он обладает небольшим атомным весом и не может быть удержан на теле столь малой массы. Аналогичная ситуация, очевидно, характерна для еще одного относительно крупного тела на периферии Солнечной системы — спутника Нептуна Тритона. Как и на Плутоне, на нем нет заметных следов атмосферы, что можно объяснить прежде всего за счет вымерзания газа, которое в условиях слабой инсоляции и отсутствия внутренних источников тепла становится определяющим.

В семействе галилеевых спутников основным механизмом, контролирующим наличие атмосферы при более высоких температурах на поверхности, служит диссипация. Экспериментально, путем наземных наблюдений и по измерениям с космических аппаратов «Пионер», была обнаружена атмосфера у Ио с давлением у поверхности около 10^{-5} мбар и существование тороидального облака плазмы вдоль его орбиты. С учетом интенсивной диссипации для удержания даже такой разреженной атмосферы требуется постоянный подвод газов, источник которого стал ясен только после открытия на Ио активного вулканизма. В ультрафиолетовых спектрах плаз-

менного тора этого спутника были отождествлены ионы серы и кислорода, что не оставляет сомнения в их вулканическом происхождении. Над отдельными теплыми районами поверхности, отождествляемыми с очагами вулканической деятельности, обнаружена также разреженная атмосфера, состоящая из двуокиси серы (SO_2). На прилегающих холодных участках поверхности содержание SO_2 резко падает, другими словами, он вымерзает на поверхности, а атмосфера коллапсирует, становясь экзосферой.

Подобных источников поступления газов в атмосферу нет на других телах данного семейства. Поэтому только на самом крупном Ганимеде предполагалось существование древней атмосферы с давлением у поверхности даже более высоким, чем у Ио. Однако измерения на «Вояджере» показали, что давление не превышает 10^{-8} мбар, т. е. и у этого спутника Юпитера атмосферы практически нет. Отсутствие обнаружимых атмосфер на таких почти одинаковых по размерам телах, как Плутон, Тритон и Ганимед, и в то же время наличие атмосферы на Титане представляет собой один из любопытных феноменов в Солнечной системе.

НА ГРАНИЦЕ АТМОСФЕРЫ И КОСМОСА

Каждое из небесных тел в пределах Солнечной системы существует не изолированно, а подвержено влиянию происходящих на Солнце процессов. Изменение солнечной активности сопровождается значительными вариациями потоков электромагнитного и корпускулярного излучений, которые непосредственно взаимодействуют прежде всего с самыми внешними областями пространства, примыкающего к планете — ее верхней атмосферой, ионосферой, магнитосферой. Газовый и магнитный «щиты» планеты препятствуют прямому проникновению к поверхности наиболее жесткой части солнечного спектра (ультрафиолетовых и рентгеновских лучей) и наиболее энергичных заряженных частиц, присутствующих в потоках солнечной плазмы. «Принимая удар на себя», области околопланетного пространства претерпевают серьезные изменения — молекулы распадаются на атомы (диссоциируются), часть атомов и молекул ионизуется и образуется ионосфера, часть силовых линий магнитного

поля планеты «сносится» на ночную сторону, образуя ее «магнитный шлейф». В магнитном поле происходят процессы ускорения и фокусировки частиц солнечной плазмы, которые, вторгаясь в атмосферу, вызывают грандиозные природные явления — полярные сияния. Частицы, захватываемые на силовые линии магнитного поля, образуют радиационные пояса. В отсутствие поля возникают иные эффекты, главную роль играет ионосфера (ее профили показаны на рис. 55).

Наиболее характерной особенностью взаимодействия солнечной плазмы с Венерой и Марсом является образование переходной зоны (ионопаузы) с дневной стороны планеты в области, расположенной за ударной волной на высотах примерно 500—1000 км. Радиационных поясов у них нет. Ионопауза образуется в зоне, где давление солнечного ветра (составляющее для Венеры приблизительно одну стомиллиардную долю миллибара) примерно уравновешивается давлением ионосферных заряженных частиц вместе с давлением собственного магнитного поля планеты. В идеальной модели ионосферы бесконечной проводимости токи, индуцированные потоком солнечного ветра, лежат на поверхности ионопаузы и непосредственно в примыкающей к ней сверху области. Поэтому результирующее индуцированное магнитное поле расположено вне ионосферы. Видимо, примерно аналогичная ситуация сохраняется и в более реальном случае ионосферы конечной проводимости, поскольку время магнитной диффузии значительно больше времени изменения направления межпланетного магнитного поля, и диффузия последнего в невозмущенную ионосферу пренебрежимо мала.

На самом деле картина взаимодействия является значительно более сложной и имеет ряд специфических черт отдельно для Венеры и Марса, как это было выявлено по результатам плазменных экспериментов на искусственных спутниках этих планет. Комплексный характер процессов в области обтекания, помимо образования промежуточной зоны, отождествляемой с ионопаузой, включает также в себя последовательность разогрева и термализации ионов, образование зоны разрежения за ударной волной и много других особенностей. К ним, в частности, относятся обнаруженные необычайно высокие температуры электронов и ионов в ионосфере Венеры — соответственно около 5000 К и 1000 К, т. е. примерно

на порядок превышающие экзосферную температуру этой планеты. Это свидетельствует о неэффективности процессов температурной релаксации, в отличие от того, что наблюдается на Земле, где электронно-ионная и нейтральная температуры вплоть до 500—1000 км не имеют больших различий. Причем самое удивительное то, что почти столь же высокие значения электронной и ионной температуры сохраняются и на ночной стороне, на фоне температуры основной (нейтральной) атмосферы 100 К. Это заставляет искать механизмы подвода энергии на ночную сторону планеты и ночной ионизации, которые, вероятнее всего, связаны с интенсивным динамическим обменом и процессами электромагнитного взаимодействия.

Уникальное образование в Солнечной системе представляет собой магнитосфера Юпитера. Во многих чертах она аналогична земной, увеличенной примерно в 100 раз, так что при наблюдении с Земли ее угловой поперечник достигает 2°. Физические свойства пространства внутри магнитосферы определяются собственным магнитным полем планеты, создающим естественный барьер для непосредственного проникновения в эту область натекающей солнечной плазмы. С дневной стороны внешняя граница магнитосферы отстоит на 50—100 радиусов от Юпитера, изменяясь в этих пределах в зависимости от флуктуаций потока солнечного ветра, а с ночной стороны образуется магнитный шлейф, который простирается на расстояние, превышающее 5 а.е., за орбиту Сатурна. Внутри юпитерианской магнитосферы лежат орбиты галилеевых спутников и Амальтеи. Заряженные частицы, захваченные магнитным полем и образующие радиационный пояс, оказывают в свою очередь сильное влияние на топологию поля и конфигурацию магнитосферы (рис. 56). Вращаясь вместе с планетой, они образуют во внешних областях, где поле ослаблено, «магнитный диск», отклоняющийся от плоскости магнитного экватора к плоскости, перпендикулярной оси вращения.

По аналогии с Землей можно предполагать, что основным источником частиц радиационного пояса Юпитера служат протоны и электроны, поставляемые солнечным ветром и переносимые во внутренние области магнитосферы с ее границы нестационарными электрическими и магнитными полями. Потери определяются

главным образом рассеянием быстрых частиц на волнах турбулентной плазмы, возбуждаемых за счет механизма циклотронной неустойчивости. Дополнительные потери, очевидно, связаны с мощным ускорением электронов в магнитосфере Юпитера. Эти электроны, обладающие энергиями от единиц до нескольких десятков миллионов электронвольт (Мэв), с характерной 10-часовой периодичностью, соответствующей периоду вращения планеты,

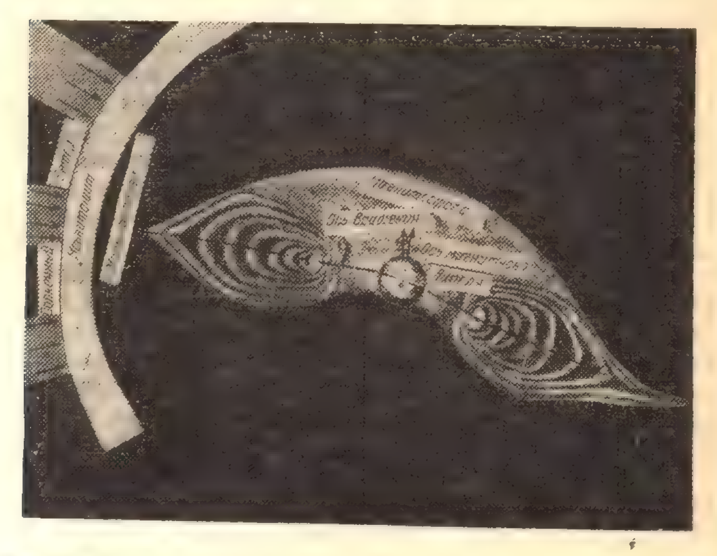


Рис. 56. Топология магнитосферы Юпитера. Слева выделены зоны, образующиеся на границе магнитосферы (перед радиационными поясами) при натекании солнечной плазмы.

регистрировались на удалениях вплоть до орбиты Земли. Внутри магнитосферы генерируется также хорошо известное дециметровое и декаметровое радиоизлучение Юпитера. Всплески декаметрового излучения на частоте ≈ 8 МГц, вероятно, связаны с плазменными нестабильностями ионосферы, либо с электрическими разрядами в атмосфере, в то время как дециметровое излучение, объясняемое синхротронным механизмом, возникает при движении захваченных релятивистских электронов с энергиями ≈ 10 Мэв между магнитными полюсами на расстояниях $\approx 1{,}5$—6 радиусов планеты. Это излучение модулировано с частотой, соответствующей периоду об-

ращения Ио, что вероятно обусловлено взаимодействием с его плазменным тором, который образован ионами серы и кислорода и может сам служить источником низкочастотного радиоизлучения (с длиной волны порядка километра), зарегистрированного аппаратами «Вояджер».

С тороидальным облаком плазмы, вращающимся вместе с магнитным полем Юпитера, по-видимому, связано и другое замечательное природное явление, хорошо известное у нас на Земле — полярные сияния. Они наблюдались в атмосфере Юпитера во время обоих недавних пролетов космических аппаратов на высотах 700, 1400 и 2300 км от видимой верхней границы облаков (в то время как на Земле полярные сияния в основном происходят на высотах 100—200 км). Изучение полученных результатов выявило интересную особенность: в зону полярных сияний проецируются магнитные силовые линии, проходящие через плазменный тор на орбите Ио. В результате образуются токовые трубки, присоединенные с двух сторон к Юпитеру в его приполярных областях. Предполагают, что потоки электронов и ионов, вторгающихся в атмосферу вдоль магнитных силовых линий, интенсифицируются сильными электрическими полями. Сила тока, текущего внутри токовой трубки, оценивается величиной порядка пяти миллионов ампер.

В заключение упомянем еще об одной интересной особенности, обнаруженной в магнитосфере планеты. Речь идет о Сатурне, обладающим, как уже говорилось, не очень сильным магнитным полем по сравнению с магнитным полем Юпитера. Поэтому у него значительно более «скромная» магнитосфера, а высокая степень однородности магнитного поля находит свое проявление в особой симметрии популяции заряженных частиц в ее внутренней зоне, на расстоянии приблизительно десяти радиусов планеты. Особенность, о которой мы упомянули, связана с кольцами Сатурна, располагающимися внутри этой зоны. Оказалось, что, как и предсказывалось, заряженные частицы в пределах системы колец полностью выметены. Это явление получило название «гильотинного эффекта», в результате которого образовалась наиболее свободная от радиации область в Солнечной системе. Выметание частиц происходит в результате их поглощения материалом кольца, который они встречают при колебательном движении между полушариями вдоль

магнитных силовых линий. Этот эффект привел в свою очередь к предположению о существовании ранее неизвестного самого внешнего кольца G, расположенного на расстоянии между 10 и 15 $R_{♄}$.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА И АТМОСФЕРНОЙ ДИНАМИКИ

Отдельный комплекс проблем представляет тепловой режим планетной атмосферы и ее динамика. Тепловой режим определяется количеством падающей на планету солнечной лучистой энергии (энергетической освещенностью) за вычетом энергии, отражаемой обратно в космическое пространство. Он зависит, таким образом, от расстояния a планеты от Солнца и ее интегрального сферического альбедо A, поскольку внутренними источниками тепла для всех планет земной группы можно пренебречь (их вклад не превышает миллионных долей процента). Величина потока солнечной радиации, падающая по нормали на единичную площадку земной поверхности в отсутствии атмосферы, определяет солнечную постоянную E_c, равную 1,96 кал/см²·мин, или 1365 Вт/м². Через эти три величины и постоянную закона Стефана — Больцмана σ выражается важный параметр, служащий мерой поступающей на планету энергии,— ее равновесная, или эффективная, температура $T_e = [E_c(1-A)/4\sigma a^2]^{1/4}$, где a выражается в а. е., а четверка в знаменателе учитывает то обстоятельство, что поток энергии падает на диск, а излучается со сферы. Значения эффективной температуры для всех планет приведены в табл. 4.

Таблица 4

	T_e, К	$T_{ср}$, К	$\tau = \frac{mC_p T_{ср}}{\sigma T_e^4}$
Венера	228	480	$3 \cdot 10^9$
Земля	255	275	10^7
Марс	216	235	$3 \cdot 10^5$
Юпитер	134	160	$\approx 10^9$

Планетарная динамика отражает баланс между скоростью генерации потенциальной энергии за счет сол-

нечной радиации и скоростью потери механической энергии за счет диссипации. С этой точки зрения атмосферу планеты часто сравнивают с тепловой машиной, у которой нагревателем служат районы экваториальных широт, а холодильником — полюсы. Коэффициент полезного действия (КПД) такой машины мал, он не превышает единиц процентов.

Сделаем простейшие оценки для атмосферы Земли, воспользовавшись приведенным выше значением солнечной постоянной. Поток солнечной энергии на земную поверхность составляет около $3 \cdot 10^{13}$ ккал/с, или $1,25 \times 10^{17}$ Вт. Это означает, что только за один час Солнце отдает нам $\approx 5 \cdot 10^{17}$ кВт-часов энергии. Чтобы лучше понять, сколь внушительна эта величина, укажем для сравнения, что для ее получения потребовалось бы каждый час сжигать $5 \cdot 10^{9}$ тонн нефти! Полная кинетическая энергия атмосферных движений сохраняется практически неизменной, составляя около 10^{21} джоулей (около $3 \cdot 10^{14}$ кВт-час), а скорость превращения потенциальной энергии в кинетическую оценивается величиной $2 \cdot 10^{12}$ кВт. Отсюда немедленно следует, что, во-первых, типичное время превращения энергии в земной атмосфере $3 \cdot 10^{14}$ кВт-час/$2 \cdot 10^{12}$ кВт≈ 150 часов, т. е. примерно неделя, а во-вторых, что КПД атмосферной тепловой машины $2 \cdot 10^{12}$ кВт/$1,25 \cdot 10^{14}$ кВт$\approx 1,6\%$.

Источником атмосферных движений различных пространственных масштабов служит отсутствие равенства между поступающей и отдаваемой энергией в отдельных участках планеты при общем строгом выполнении условия теплового баланса в глобальном масштабе, характеризуемого эффективной температурой. Другими словами, ветровая система на планете создается за счет неодинакового распределения солнечного тепла в пространстве и во времени и зависит от того, имеет ли механизм теплового воздействия период больший или меньший периода собственного вращения планеты. С этой точки зрения Земля, Венера, Марс, Юпитер имеют вполне определенные сходства и различия, что проявляется в специфике механизмов, ответственных за тепловой баланс и процессы динамического обмена на планетарном, мезомасштабном и локальном уровнях.

Вследствие термического расширения, обусловленного зависимостью плотности газов, помимо давления, также и от температуры (это свойство называют баро-

клинностью), сильнее нагретый, а значит, наименее плотный воздух поднимается вверх, а более холодный и тяжелый опускается вниз. Поэтому на первый взгляд кажется очевидным, что возникающие из-за различия инсоляции, а значит, и горизонтальных градиентов температуры, перепады давления (барические градиенты) должны приводить к регулярному переносу воздушных масс (и соответственно избытка тепла) из тропиков к полюсам. Вдоль меридиана образуется при этом гигантская замкнутая конвективная ячейка, в верхней части которой теплый воздух будет переноситься от экватора к полюсу, а вдоль поверхности — холодный воздух от полюса к экватору. Сама такая ячейка носит название гадлеевской по имени известного английского астронома Джона Гадлея, который еще в первой половине XVIII столетия выдвинул и обосновал предположение о том, что различное нагревание Солнцем экваториальных и полярных районов должно быть основной причиной общей циркуляции земной атмосферы. На самом деле такая симметричная относительно экватора циркуляция ни в атмосфере Земли, ни в атмосферах других планет не устанавливается. Причиной является наличие из-за вращения планеты силы Кориолиса, действие которой подробно разбирается в школьных учебниках физики. В динамике атмосферы (а на Земле также и океана) определяющую роль играет ее горизонтальная составляющая, благодаря которой меридианальные течения отклоняются от направления своего движения в северном полушарии вправо, а в южном — влево. В результате протяженность меридиональной циркуляции сильно ограничивается, и ячейка Гадлея доминирует в земной атмосфере только на самых низких широтах, примерно до 30° по обе стороны от экватора. А в атмосфере средних и высоких широт циркуляция приобретает зональный характер, т. е. движения происходят вдоль параллелей. Поскольку первичным источником их являются градиенты температуры, сами ветры называют термическими. В тропосфере дуют западные ветры, направленные с запада на восток, в то время как в стратосфере ветры изменяют свое направление: зимой дуют западные, а летом восточные, причем здесь наблюдаются особенно большие скорости, до 50—100 м/с.

При определении поля ветров удобным приближением, практически реализующимся в атмосфере, служит

понятие геострофического потока, или геострофического ветра, соответствующего условию, когда градиенты горизонтального давления сбалансированы силами Кориолиса. Сила такого термического ветра зависит от градиента давления и направлена вдоль линий равного давления — изобар. Но данная схема является весьма идеализированной. Реальный характер циркуляции определяется наложением нескольких типов движений, степень неупорядоченности которых сильно зависит от угловой скорости вращения планеты. На вращающейся планете развиваются волновые движения, называемые волнами Россби. С ростом угловой скорости и при больших перепадах температур вдоль меридиана такие волны становятся неустойчивыми, при их разрушении возникают вихри. В атмосфере Земли размеры этих вихрей изменяются в широких пределах, от очень мелких, порядка миллиметров, до нескольких тысяч километров поперечником.

Мелкие и средние вихри служат элементами атмосферной турбулентности, а самые крупные образуют хорошо известные области низкого и высокого давления — циклоны и антициклоны. В циклонах происходит циркуляция воздуха вокруг центра низкого давления в направлении против часовой стрелки в северном полушарии и по часовой стрелке в южном, а в антициклонах направление вращения вокруг центра высокого давления обратное. Время их жизни в атмосфере в среднем как раз соответствует сделанной нами ранее оценке скорости преобразования энергии — порядка недели. Неустойчивость волн Россби, связанных с крупномасштабными системами погоды (или, как еще говорят, бароклинная неустойчивость), служит наиболее эффективным механизмом перемешивания атмосферы в меридиональном направлении, переноса тепла от экватора к полюсам и сглаживания соответствующих различий температуры у поверхности Земли. В то же время некоторые из затухающих возмущений передают кинетическую энергию среднему зональному течению (главным образом существующему на высотах тропопаузы струйному течению), что дополнительно способствует развитию циркуляции.

В изучении сложной структуры циркуляции в земной атмосфере, составляющей основу динамической метеорологии и определяющей надежность прогнозов по-

годы, сохраняется еще много нерешенных проблем Основные трудности связаны с невозможностью адекватного описания полей давления и ветра в зависимости от определяемого притоком солнечного тепла поля температуры и характеристик подстилающей поверхности. Решение численными методами системы гидродинамических уравнений при ограниченности исходных данных о полях метеорологических элементов и неизбежном отфильтровывании ряда гармонических волн в бароклинных моделях не позволяет в полной мере учесть все многообразие протекающих в атмосфере взаимообусловленных явлений.

С еще более трудной ситуацией приходится сталкиваться в попытках теоретического моделирования циркуляции на других планетах. Положение здесь усугубляется несравненно меньшим объемом экспериментальных данных, а в ряде случаев (как, например, для Урана, Нептуна) их полным отсутствием. Тем не менее в попытках описаний наблюдаемых закономерностей движений на Марсе, Венере, Юпитере достигнут значительный прогресс. Модели, учитывающие специфику условий на этих планетах, помогают вместе с тем лучше понять многие характерные черты динамики атмосферы Земли.

Некоторые упрощенные представления о движениях в планетных атмосферах можно составить, пользуясь соображениями подобия и размерностей, похожими на те, которые применяются при решении сложных гидродинамических задач. Такой подход развит в последние годы Г. С. Голицыным. Он основан на выборе критериев подобия, представляющих собой комбинации нескольких размерных параметров, которые характеризуют механические и тепловые свойства планеты, и ряда универсальных постоянных. Использование указанных критериев применительно к атмосферной и океанической циркуляции на Земле позволило воспроизвести с хорошей точностью количественные оценки скоростей соответствующих движений. Хорошая оправдываемость значений, предсказываемых этой теорией, получена также для атмосфер других планет, которые исследовались при полетах космических аппаратов.

В анализе теплового режима планетной атмосферы обычно используется понятие о постоянной тепловой релаксации τ, характеризующей время реакции атмосферы

на тепловое возмущение. Эта постоянная представляет собой отношение теплосодержания единичного атмосферного столба к величине излучаемой энергии, пропорциональной четвертой степени эффективной температуры, т. е. характеризует время, за которое запасенная энергия высветится (в табл. 4 $T_{ср}$ — средняя температура, m — масса столба, C_p — теплоемкость при постоянном давлении).

У Венеры и Юпитера сходные значения постоянных тепловой релаксации (см. табл. 4), а сами атмосферы оптически плотные, сильно ослабляющие солнечную и задерживающие собственную тепловую радиацию. В то же время атмосферы Земли и Марса практически прозрачны для приходящего солнечного излучения, и постоянные тепловой релаксации у них на 2—4 порядка меньше. К тому же они имеют одинаковые длительности суток и глубину сезонных изменений. Основное отличие между этими планетами состоит в характере реакции поверхностной температуры на суточно-сезонные изменения и различии времен радиационного выравнивания температур, которое на Марсе происходит почти на порядок быстрее. Если за счет земных океанов, действующих как мощные аккумуляторы тепла, обеспечивается поддержание средней поверхностной температуры в любом широтном поясе близким к среднегодовому значению, а атмосфера стремится распределить тепло почти равномерно по широте, то на Марсе, вследствие малой тепловой инерции грунта и малой теплоемкости атмосферы, поверхностная температура оказывается близкой к ее местному лучисто-равновесному значению в каждой точке планеты. В связи с этим более резко выражена суточная составляющая скорости ветра.

Важным метеорологическим фактором в марсианской атмосфере является четко выраженная сезонная вариация давления вследствие конденсации углекислого газа в зимней полярной шапке. Этот эффект обнаружен экспериментально в обоих местах посадки аппаратов «Викинг» и показан на рис. 57, заимствованном нами из оригинальной работы известных метеорологов — С. Хесса, К. Лиови и их сотрудников. Наблюдения охватывают почти целиком марсианский год в северном полушарии планеты. Самый глубокий минимум давления (примерно 120-е сутки от начала измерений) соответствует максимальной аккумуляции CO_2 к концу зимы на южной

полярной шапке, а другой минимум (430-е сутки) — его вымерзанию на северной шапке. Эти минимумы оказываются вблизи осеннего и весеннего равноденствия, в то время как максимум давления наблюдался вблизи перигелия во время зимнего противостояния. С таким общим изменением давления связана перестройка циркуляционной системы, а локальные флуктуации отражают изменения ветрового режима, в том числе возникновение пылевых бурь.

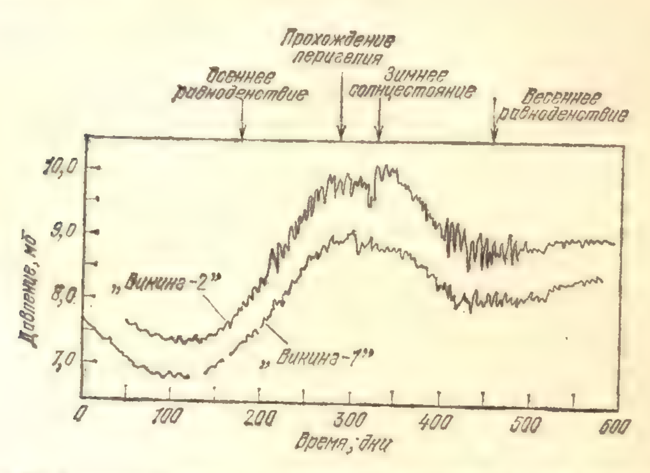


Рис. 57. Сезонные вариации парциального давления CO_2 в атмосфере Марса за счет аккумуляции углекислоты в полярных шапках (по К. Лиови).

По результатам измерений температуры атмосферы Марса в инфракрасном диапазоне, по данным о перемещении пыли на поверхности и данным непосредственных измерений с посадочных аппаратов получены оценки интенсивности и смены направлений ветра в различные периоды времени. Летом в тропических широтах на высотах 15—20 км преобладают западные ветры со скоростью 30—50 м/с, в то время как в тропосфере у поверхности направление ветра испытывает сильные суточные изменения, а среднесуточная составляющая мала, меньше 10 м/с. Наибольшей скорости (порядка 70—100 м/с) ветер достигает во время сильных пылевых бурь, обычно совпадающих с периодами противостояний. Измерения, проводившиеся в период мощной пылевой бури

1971 г., продолжавшейся около четырех месяцев, дали возможность выявить ряд интересных особенностей этого уникального природного явления, имеющего глобальный характер. Темные облака пыли, поднятой до 10 и более километров, наблюдались по всему диску, полностью сглаживая контрасты на поверхности. Было обнаружено существенное потепление самой атмосферы и более низкая температура поверхности (стремление температурного профиля к изотермическому) вследствие непрозрачности атмосферы для солнечных лучей, которые задерживались пылью. Плотность пылевых частиц в атмосфере со средними размерами 5—10 мкм составляла около 10^{-9} г/см^3. Это означает, что в атмосферу было поднято свыше миллиарда тонн пыли, спектральные характеристики которой по высокому содержанию (около 50%) окиси кремния примерно соответствовали составу поверхностных пород. Заметим, что по существующим оценкам приблизительно такое же количество (около 10^9 т) пыли ежегодно выбрасывается в земную атмосферу, что со временем может стать серьезным климатическим фактором.

Иная специфика теплового режима и атмосферных движений характерна для Венеры и Юпитера. Обладая близкими значениями времен тепловой релаксации, эти планеты принципиально отличаются по скоростям вращения: Юпитер вращается почти в два с половиной раза быстрее, а Венера в 243 раза медленнее Земли. Поэтому, в то время как на Юпитере зональные течения совершенно очевидно определяются мощной кориолисовой составляющей, вращение Венеры, по-видимому, мало влияет на атмосферные движения. При очень большой длительности венерианских суток важным фактором, определяющим характер циркуляции, может быть разность температур не только между экватором и полюсами, но и между подсолнечной и антисолнечной точками.

Еще всего несколько лет назад шли оживленные дискуссии о том, за счет какого механизма в атмосфере Венеры поддерживается столь высокая температура. Ведь к Венере поступает почти столько же энергии, сколько к Земле, несмотря на то что она ближе к Солнцу и освещенность ее на этом расстоянии почти вдвое превышает солнечную постоянную E. Дело в том, что альбедо у Венеры тоже приблизительно вдвое выше, поэтому величины неотраженной солнечной радиации оказываются сопо-

ставимыми. Рассматривались в основном две альтернативные модели: парниковая, предложенная в 1960 г. известным американским планетологом К. Саганом, и модель глубокой циркуляции, предложенная в 1966 г. двумя известными специалистами в области физики атмосферы и геофизической гидродинамики Р. Гуди и А. Робинсоном. Согласно парниковой модели определенная доля солнечного излучения проникает до поверхности и поглощается ею, а излучение нагретой поверхности происходит на более длинных (инфракрасных) волнах. Это тепловое излучение улавливается атмосферой из-за наличия в ней трехатомных молекул углекислого газа и водяного пара, имеющих в этой области спектра сильные полосы поглощения, а также экранируется непрозрачными для этих длин волн облаками. В результате поверхность и нижняя атмосфера разогреваются, при этом часть тепла выносится наверх в результате конвекции. Установившемуся лучисто-конвективному теплообмену по вертикали соответствует измеренный адиабатический профиль температуры. Такая модель подробно рассматривалась В. С. Авдуевским, автором и их сотрудниками.

Наиболее сильными аргументами критиков парниковой модели были два соображения: во-первых, что облака Венеры очень плотные, а атмосфера сильно запылена, так что солнечный свет не проникает до поверхности, а во-вторых, что вряд ли возможно создать требуемую высокую непрозрачность для уходящей тепловой радиации. Это вызвало к жизни модель глубокой циркуляции, исторически предшественницей которой была так называемая эолосферная (или ветровая) модель, предложенная Э. Эпиком. Эпик предполагал, что солнечная энергия поглощается в верхних областях атмосферы, находящейся в конвективном равновесии, и передается к поверхности планеты за счет трения о нее пылевых частиц при ветровых движениях. Между тем уже само требование конвективного равновесия должно приводить к переносу поглощаемой энергии к нижележащим слоям атмосферы и установлению адиабатического температурного профиля вплоть до поверхности. С этой точки зрения добавление дополнительного источника тепла за счет трения оказывается несущественным.

Эти соображения и были учтены Гуди и Робинсоном, которые обошли ряд трудностей, с которыми сталкива-

лась эолосферная модель, и развили оригинальную схему теплового переноса в глубокой атмосфере Венеры, использовав аналогию с океанической циркуляцией на Земле. В этой модели солнечная энергия, поглощаемая на освещенной Солнцем верхней границе облаков, переносится на ночную сторону за счет крупномасштабных движений. Сток газа в районе антисолнечной точки и подъем в районе подсолнечной точки обусловливают соответственно его адиабатический нагрев и охлаждение. В результате в атмосфере устанавливается адиабатический температурный градиент, причем, чем атмосфера глубже, тем выше будет температура поверхности.

Прямые измерения освещенности на станциях «Венера» показали, что значительная доля поступающей к планете солнечной лучистой энергии в действительности проходит сквозь облака и достигает поверхности. Измерения привели к выводу, что в облаках задерживается не более половины светового потока и что поверхность поглощает около 100 Вт/м^2, или примерно шестую часть энергии, приходящей к Венере.

Итак, первое серьезное возражение против парниковой модели было снято, и вместе с тем исключена одна из главных предпосылок модели глубокой циркуляции о поглощении солнечного излучения на «вершине» облаков. Одновременно проводилась серия расчетов с целью анализа особенностей переноса тепловой радиации в атмосфере Венеры с учетом очень сильной зависимости структуры полос поглощения CO_2 и H_2O от температуры и давления. Интересные результаты были получены здесь одним из сотрудников автора В. П. Шари. Оказалось, что даже атмосфера, состоящая целиком из углекислого газа с параметрами, соответствующими венерианским, обеспечивает перекрытие основной части потока теплового излучения, а добавление водяного пара с относительным содержанием всего несколько тысячных долей процента закрывает ее практически целиком. Включение в модель сильно экранирующих облаков, состоящих из капелек серной кислоты, еще больше усиливает этот эффект. При этом вынос тепла с поверхности и из нижней атмосферы оказывается близким к величине поглощаемой солнечной радиации и хорошо согласуется со значениями тепловых потоков, измеренных на аппарате «Пионер — Венера».

Таким образом, можно считать доказанным, что основным механизмом, ответственным за поддержание высокой поверхностной температуры Венеры, является парниковый эффект. Что же касается модели глубокой циркуляции, то представление о таком механизме должно быть дополнительно существенно уточнено.

Уже вскоре после появления этой модели было показано, что гипотетические циркуляционные ячейки, охватывающие почти половину окружности планеты, неустойчивы. Устойчивая циркуляция может развиться лишь тогда, когда создаются необходимые условия для возникновения сильного парникового эффекта, т. е. возникает «сверхадиабатичность» исходного температурного профиля у поверхности. Другими словами, устойчивость крупномасштабных ячеек тем выше, чем глубже в атмосферу проникает солнечная радиация. Но именно такая ситуация, как мы теперь знаем, и реализуется в атмосфере Венеры, что привело к сближению ранее казавшихся противоречивыми моделей.

Так или иначе остается несомненным, что главную роль в тепловом режиме Венеры играет крупномасштабная динамика, за счет которой происходит выравнивание температур между экватором и полюсами, между дневной и ночной полусферами. Поэтому парниковый эффект следует рассматривать как удобное локальное приближение и, возможно, как движущий источник для механизма планетарной циркуляции на этой планете.

Циркуляция на Венере прослеживается с поверхности Земли по дрейфу отдельных неоднородностей на уровне облаков при наблюдении в ультрафиолетовых лучах. В этих неоднородностях сохраняются в течение длительного времени (несколько недель) устойчивые очертания, среди которых особенно характерна положенная на бок латинская буква Y. Перемещения облачных структур и их конфигурации подробно исследовались с борта космических аппаратов «Маринер-10» и «Пионер — Венера», передавших большое число фототелевизионных изображений облаков (рис. 58). Основная составляющая движений имеет среднюю скорость около 100 м/с, на которую накладываются другие коротко- и долгопериодические составляющие и волновые процессы. Этой средней скорости соответствует четырехсуточный период повторяемости отдельных конфигураций, получивших назва-

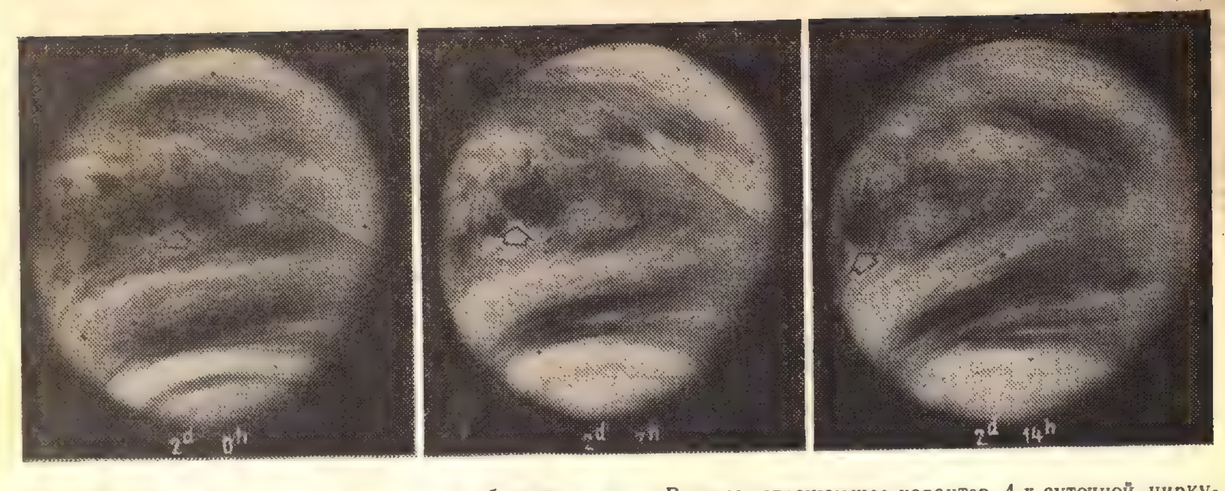


Рис. 58. Перемещение ультрафиолетовых облаков на диске Венеры, отражающее характер 4-х суточной циркуляции в атмосфере планеты. Снимки сделаны «Маринером-10» с интервалами в 7 часов на вторые сутки после наибольшего сближения с планетой.

ние «ультрафиолетовых облаков». Они находятся на уровне верхней границы основной зоны облачности и надоблачной дымки (см. рис. 55) и перемещаются со скоростью, которая почти в 60 раз больше скорости вращения поверхности самой планеты.

При спуске автоматических станций «Венера» в атмосфере планеты производились измерения зональной составляющей скорости ветра путем регистрации доплеровского сдвига частоты бортовых передатчиков спус-

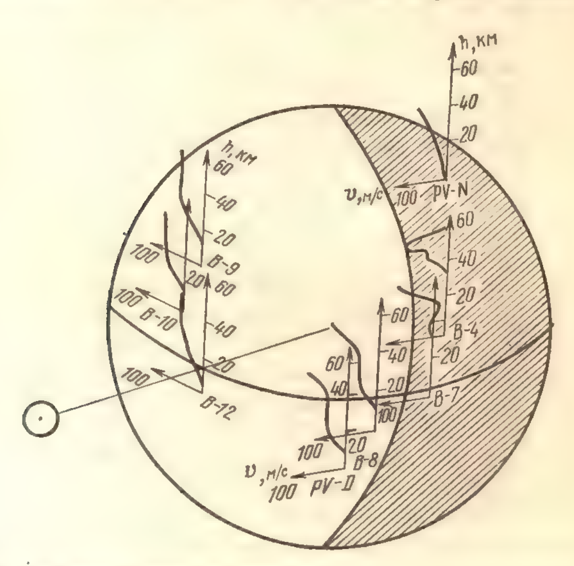


Рис. 59. Высотные профили скорости зонального ветра в атмосфере Венеры по измерениям на станциях «Венера» и зондах «Пионер — Венера» *PV* (*N* — ночной и *D* — дневной). Выявляется устойчивый характер движений с небольшими вариациями в зависимости от времени суток и широты.

каемых аппаратов. Этим методом было установлено, что у поверхности скорость ветра очень мала, а с увеличением высоты она быстро нарастает, достигая скорости перемещения «ультрафиолетовых облаков» на уровне 50—60 км, т. е. примерно там, где они наблюдаются. Такой характер движений с небольшими вариациями скорости ветра сохранялся в различных районах планеты, где совершали спуск наши аппараты, а позднее также и американские зонды «Пионер —Венера», как это хорошо

видно из рис. 59. Это привело к выводу о существовании единой циркуляционной системы на Венере, охватывающей всю тропосферу и стратосферу планеты, с четко выраженной зональной и относительно слабой (5—10 м/с) меридиональной составляющей. Небольшая скорость ветра у поверхности (0,5—1 м/с) была подтверждена в 1975 г. прямыми измерениями чашечными анемометрами, установленными на посадочных аппаратах «Венера-9 и 10».

Феномен четырехсуточной циркуляции представляет сложную проблему и пока до конца не понят, хотя предприняты многочисленные попытки его объяснения в рамках различных гидродинамических моделей. Наиболее реалистичным нам кажется механизм, в котором предполагается развитие первоначально возникшей флуктуационной неустойчивости в крупной конвективной ячейке типа гадлеевской, на которую накладывается горизонтальное возмущение (профиль ветра). Устойчивость циркуляции обеспечивается при этом за счет перекачки энергии конвективных движений в энергию зонального потока. Принципиальная реализуемость такого механизма была показана серией численных расчетов. В рамках этой теоретической модели удалось также воспроизвести ряд эффектов, наблюдавшихся в экспериментах со ртутью, заключенной в торовый сосуд, подогреваемый газовой горелкой. Последняя имитировала Солнце, в то время как ртуть, заключенная в ограниченном объеме, позволяла наилучшим образом моделировать параметры, от которых зависит динамика атмосферы Венеры.

ЦИРКУЛЯЦИЯ НА ЮПИТЕРЕ

Находясь на расстоянии от Солнца около 5 а. е., Юпитер получает только 4 % от потока солнечной энергии, приходящего к Земле, а Сатурн — еще вчетверо меньше. Более эффективны внутренние потоки тепла, о чем говорилось выше. С точки зрения атмосферной динамики эти планеты имеют большое сходство вследствие очень большой скорости их вращения, чем обусловлена полосчатая структура на уровне наблюдаемой верхней границы облаков. Можно поэтому предполагать, что движения в атмосфере Сатурна носят примерно такой же характер, как и в атмосфере Юпитера, о котором нам известно сейчас больше.

Астрономия приблизительно за сто лет накопила огромный наблюдательный материал, что позволило установить целый ряд важнейших закономерностей в структуре циркуляции на Юпитере. Много новых сведений принесли измерения, проведенные на космических аппаратах «Пионер-10 и 11» и особенно на аппаратах «Вояджер-1 и 2» (рис. 60 и 61). Особенно информативны цветные изображения, полученные при пролетах «Вояджеров». Последовательность снимков с высоким разрешением, передававшихся каждые два часа, дала возможность выявить интересные детали в свойствах движений и структуре облаков. Однако самым важным результатом этих недавних экспериментов следует в первую очередь считать тот факт, что основанные на гораздо более ограниченном материале представления о динамике атмосферы Юпитера в своих основных чертах оказались верными.

Характерным свойством движений на Юпитере является наличие зональной циркуляции тропических и умеренных широт. Эти течения хорошо описываются моделью геострофически сбалансированного термического ветра (об этих понятиях говорилось раньше применительно к земной метеорологии), а сама циркуляция является осесимметричной, т. е. почти не имеющей отличий по долготе. Скорости восточных и западных ветров в зонах и поясах составляют от 50 до 150 м/с. На экваторе дует ветер в восточном направлении со скоростью около 100 м/с.

Структура зон и поясов различается характером вертикальных движений, от которых зависит формирование горизонтальных течений. В светлых зонах, температура которых ниже, движения восходящие, облака плотнее и располагаются на более высоких уровнях в атмосфере. В более темных (красно-коричневых) поясах с более высокой температурой движения нисходящие, они расположены глубже в атмосфере и закрыты менее плотными облаками. Восходящие течения в зонах, растекающиеся в меридиональном направлении в противоположные стороны, под действием кориолисовой силы приобретают зональные составляющие, направленные в противоположные стороны по краям зоны. Так, в зонах северного полушария поток, направленный к полюсу, будет отклоняться к востоку, а направленный к экватору — к западу. В зонах южного полушария картина обратная.

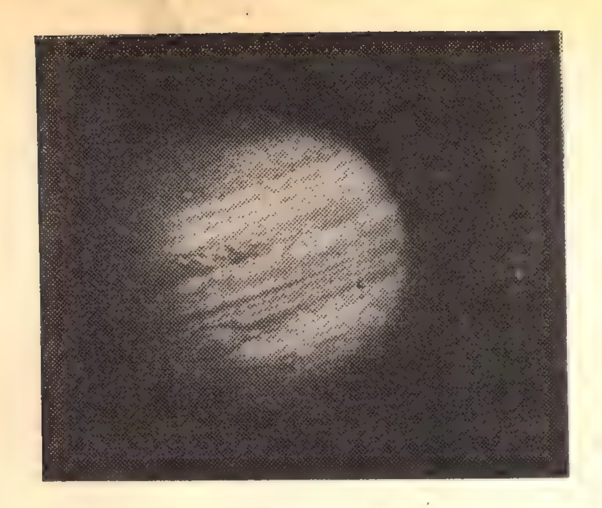


Рис. 60. Система зон и поясов на диске Юпитера. Видны два галилеевых спутника: Ио на диске планеты и Европа справа (снимок «Вояджера-1»).

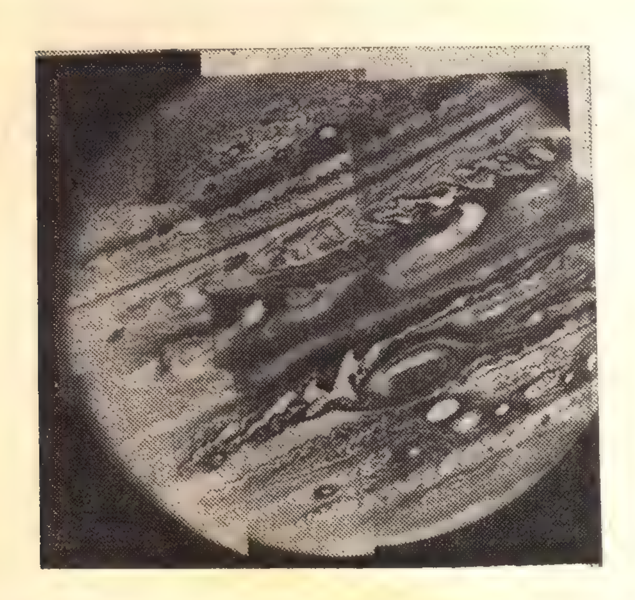


Рис. 61. Структура циркуляции на Юпитере. Мозаика снимков, переданных «Вояджером-1» с расстояния 7,8 млн. км. Разрешение около 140 км.

Таким образом, на северной и южной границах зон с поясами развиваются встречные течения, возникают явления относительных «сдвигов», так называемые ширы, охватывающие области шириной порядка тысячи километров. Здесь скорости ветра максимальны. Общие представления о такой модели дает схема на рис. 62.

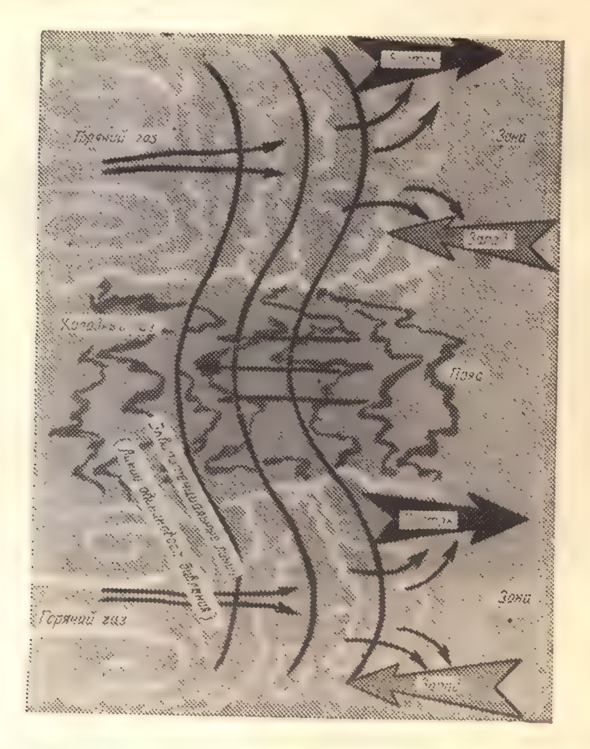


Рис. 62. Схема формирования системы зон и поясов на Юпитере, отражающая основные свойства циркуляции.

С ростом широты движения постепенно утрачивают регулярный характер и выше 60° сменяются сильно неупорядоченной структурой. Видимо, основную роль здесь играет конвекция, источником которой служит подвод тепла из недр, поскольку инсоляция, вносящая вклад в образование развитой системы зон и поясов, в высоких широтах становится неэффективной.

Подобно Земле, зональные течения на Юпитере бароклинно неустойчивы, что приводит к возникновению длинных волн Россби и образованию вихрей при их разрушении. Поэтому на регулярные движения накладываются вихревые конфигурации типа циклонов и антициклонов. В поясах наблюдаются циклонические, а в зонах антициклонические структуры. Наиболее характерным представителем их является Большое красное

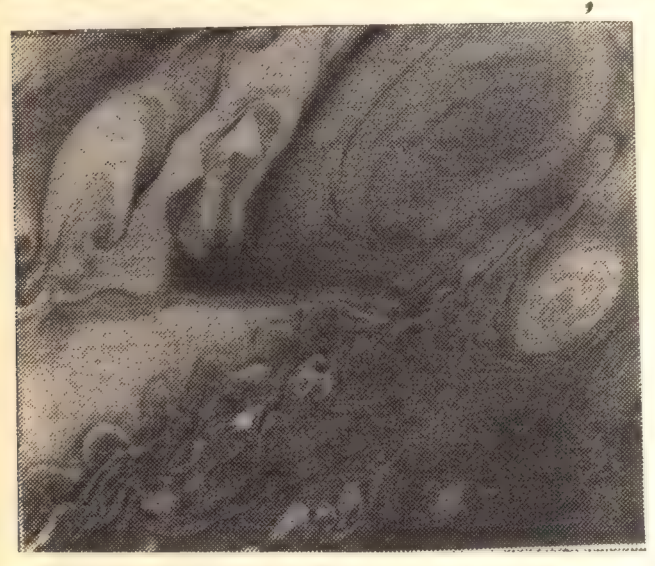


Рис. 63. Структура течений внутри Большого Красного пятна, под которым видны другие светлые пятна. Движения сильно турбулентные (снимок «Вояджера-1» с расстояния 5 млн. км; разрешение 95 км).

пятно (БКП) и многочисленные пятна меньших размеров. Среди них выделяются белые овалы в средних широтах (±35°), в которых, также как и в БКП, различается спиральная структура облаков. С каждым из них непосредственно связаны сильно возмущенные, турбулизованные области течений, в которых активную роль играют волновые процессы. Это особенно хорошо видно на рис. 63 в зоне овала, расположенного ниже БКП.

БКП имеет форму эллипса с полуосями ~15 и 5 тыс. км. Оно наблюдается уже около 300 лет, и в течение этого времени его размеры и контраст неоднократно изменялись. За последние 15 лет оно трижды претерпе-

вало изменение активности. То, что характер движений внутри БКП соответствует режиму антициклонической циркуляции, было найдено еще в конце 60-х годов путем прослеживания в течение нескольких недель перемещения небольшой темной детали по периферии пятна. Тем не менее еще несколько лет спустя продолжали энергично обсуждаться другие гипотезы относительно его природы. К этому времени, правда, мало кто верил предположениям, что это громадный вулкан или остров, плавающий в плотной атмосфере. Более популярной оставалась гипотеза известного метеоролога Р. Хайда о том, что БКП представляет собой возмущение, возникающее при обтекании некоторого препятствия на твердой поверхности планеты (так называемую колонну Тейлора). Однако, помимо предположения о наличии у Юпитера такой поверхности (что и тогда далеко не все считали очевидным), в этом случае нужно было также допустить, что его вращение происходит неравномерно. Ведь БКП не остается на одном месте, а нерегулярно дрейфует вдоль параллели, так что период его вращения отличается от периода вращения самóй планеты. Установлено, что за сто лет наблюдений оно почти три раза обошло планету.

Предположение, что БКП — это свободный вихрь в атмосфере антициклонического типа, впервые было выдвинуто Г. С. Голицыным и оказалось наиболее отвечающим современным представлениям. Исходя из простых соображений о росте энергии циркуляции со скоростью вращения и времени превращения энергии (которое на Юпитере по сравнению с Землей на много порядков больше), он получил оценку характерного периода сохранения циркуляции на Юпитере в пределах от ста тысяч до миллиона лет. Атмосферные вихри, очевидно, существуют более ограниченное время, однако значительно большее, чем циклоны и антициклоны на Земле. Оценка для БКП дает время порядка нескольких тысяч лет, для более мелких вихрей — десятки лет. Следует подчеркнуть, что сам факт длительного сохранения таких конфигураций и всей структуры течений на диске Юпитера пока не имеет достаточно строгого теоретического обоснования и относится к наиболее трудным проблемам геофизической гидродинамики.

Период вращения внутри БКП составляет около 6 дней. Очень интересна динамика течений в его окрест-

ности, которую оказалось возможным подробно исследовать по фотоснимкам с «Вояджеров». Малые пятна (подобные тем, по которым прослеживался характер циркуляции в БКП с Земли) обычно подходят к нему с востока. Некоторые из них сразу же отклоняются к северу и в дальнейшем захватываются направленным к востоку течением, уходя из зоны БКП. Другие дрейфуют на запад вдоль верхней границы, задерживаются на западном краю и затем либо уходят из зоны БКП дальше к западу, либо захватываются в его периферическое течение. На восточном краю пятно иногда расщепляется, и одна его часть продолжает вращение вокруг БКП, а другая дрейфует к востоку.

Наконец, в связи с обсуждением структуры и свойств БКП упомянем еще об одном интересном явлении, обнаруженном в областях зон, где, как мы уже говорили, происходит быстрый подъем газов из глубины за счет конвекции. Речь идет о периодически возникающих в экваториальных и средних широтах ярких белых облаках — их образно называют «плюмажами», сравнивая тем самым с украшениями из перьев на головных уборах или отделкой на женских шляпках. Размеры таких облаков составляют несколько тысяч километров, внутри различаются отдельные элементы поперечником в 100—200 км. По своей морфологии они напоминают хорошо знакомые нам кучевые облака, сильно отличающиеся от диффузных волокнистых образований на окружающем их фоне, и существуют не более 100 часов, быстро исчезая. Судя по температуре, эти облака располагаются примерно на тех же уровнях, что и облачные структуры, состоящие из более темного материала, включая вершину БКП, которая холоднее поверхности пояса. Сам по себе этот факт кажется странным, поскольку с красно-коричневыми пятнами на юпитерианском диске, как и с аналогичного цвета поясами, обычно связывают области нисходящих движений, расположенные глубже в атмосфере, где температура выше.

Как объяснить это противоречие? Очевидно, механизмы образования «темных» облаков и «плюмажей» различны. Возникновение последних возможно обусловлено волновыми процессами (прохождением «гребней волн»), накладывающимися на основное зональное течение и усиливающими конвективную активность, подобно тому, что наблюдается в тропических широтах на Земле. В то же

время предположение о наличии восходящих конвективных движений в областях красно-коричневых облаков, прежде всего в зоне БКП, может оказаться иллюзорным. На это как будто действительно указывают результаты анализа данных «Вояджеров», не обнаруживших заметного изменения высоты в структуре течений внутри БКП. Эта проблема, непосредственно связанная с происхождением и эволюцией вихрей в атмосфере Юпитера, еще ждет своего решения.

О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ

В комплексах атмосферных параметров, осредненных на достаточно больших пространственно-временных интервалах, выявляются статистические закономерности, определяющие климат на планете или в отдельных ее регионах. С точки зрения проблемы климата, включающей в качестве важнейшей задачи изучение палеоклимата и прогнозирование будущего климата Земли, первостепенный интерес представляют две соседние планеты — Венера и Марс. В качестве отправной концепции в разгадке путей их климатической эволюции обычно используется уже упоминавшееся нами предположение о том, что газы солнечного происхождения были потеряны на стадии аккумуляции земных планет, а исходный состав дегазированного из недр вещества был примерно одинаков, и что в дальнейшем решающее влияние на ход эволюции оказало удаление планеты от Солнца. Эти соображения развивались, в частности, А. П. Виноградовым, И. Расулом и К. Берчем, Д. Поллаком и другими исследователями.

Приходится, кажется, признать, что Земле больше всего «повезло», ибо, окажись она всего на 10—15 млн. км ближе к Солнцу (на четверть расстояния между орбитами Земли и Венеры), привычные нам благоприятные климатические условия вряд ли бы возникли. В этом убеждают следующие простейшие оценки, хорошо согласующиеся с более строгими теоретическими моделями.

Если допустить, что первоначальное альбедо Земли определялось целиком поверхностью и соответствовало лунному ($\approx$0,07), то при современном уровне светимости Солнца ее эффективная температура оказывается равной 275 К. При такой температуре и при достижении

сравнительно небольшого давления (около 5 мбар) наша планета могла сохранить свою воду, основные массы которой конденсировались в атмосфере и, выпадая на поверхность, сосредоточивались в океанах. Что касается углекислого газа, то в условиях сравнительно низкой температуры он аккумулировался в земной гидросфере и карбонатах осадочных пород за счет связывания с окислами металлов, входящих в состав минералов океанической коры и верхней мантии, и частично биогенным путем, за счет отложений известковых скелетов морских организмов. Основной небиогенный процесс протекает в реакциях растворенной в воде углекислоты с известными нам минералами — оливинами (ортосиликатами), содержащими железо и магний, и плагиоклазами — анортитами (алюмосиликатами), содержащими алюминий и кальций. В результате этих реакций образуются минералы (водные силикаты), содержащие гидроксильные группы (ОН) — серпентин и каолин. Поэтому первая из реакций соответственно называется серпентинизацией, а вторая — каолинизацией.

Здесь важно вообще подчеркнуть ту роль, которая согласно существующим представлениям отводится реакциям гидратации в низкотемпературной стадии конденсации протопланетного вещества. При взаимодействии оливин-пироксеновых групп минералов с парами воды образуются гидратированные силикаты, такие, как серпентин, тальк, тремолит, наиболее распространенные в углистых хондритах. Эти силикаты и служат основными скрытыми резервуарами воды, впоследствии отгоняемой из недр планеты. Сказанное делает очевидным необходимость в случае, например, Земли, рассматривать происхождение ее атмосферы и гидросферы как генетически связанный, единый эволюционный процесс.

Вернемся к нашим модельным оценкам. Полученное значение температуры на самом деле является завышенным, поскольку не учитывает факта возрастания светимости Солнца, составившего за геологическое время по разным оценкам от 35 до 60%, а также увеличение альбедо Земли с началом образования атмосферы. Современные теории звездной эволюции приводят к выводу, что лишь приблизительно 2,3 млрд. лет назад Солнце перешло на главную последовательность диаграммы Герцшпрунга — Рессела. Вплоть до этого времени средняя глобальная температура земной поверхности оказывает-

ся ниже точки замерзания даже морской воды. Но это противоречит современным геологическим и палеонтологическим данным, согласно которым примитивные фотогенные аутотрофные организмы возникли на Земле не менее 2—2,5 млрд. лет назад. К этому периоду относят древнейшие строматолиты — слоистые образования в толщах известняков и доломитов, сформировавшихся в результате жизнедеятельности колоний синезеленых водорослей.

Противоречие можно устранить, предполагая, что в раннем докембрии земная атмосфера, помимо углекислого газа и воды (и вероятно также метана и сероводорода), содержала относительно небольшое количество аммиака (порядка нескольких десятитысячных долей процента) или что в ней накопилось большое количество водорода (порядка 1 атм). Оба предположения позволяют поднять температуру выше точки замерзания воды за счет создаваемого этими компонентами сильного парникового эффекта, как это было показано в модели К. Сагана и Г. Муллена.

Для Венеры при той же величине начального альбедо равновесная температура оказывается не менее 325 К, что вплоть до давления 0,2 атм выше точки кипения воды. Таким образом, чтобы сохранить воду, Венера должна была обладать почти на два порядка более плотной начальной атмосферой по сравнению с Землей, что при одинаковых скоростях дегазации вещества мантии и диссипации атмосферы в окружающее пространство маловероятно. Скорее следует допустить, что в атмосфере постепенно накапливалась углекислота вместе с парами воды. Это в свою очередь способствовало дальнейшему росту температуры поверхности за счет парникового эффекта и переводу все больших количеств CO_2 и H_2O в атмосферу вплоть до равновесного состояния, определяемого карбонатно-силикатным взаимодейтвием в верхнем слое коры планеты.

Равновесие между парциальным давлением углекислоты и содержанием карбонатов в коре служит одним из наиболее характерных проявлений химического взаимодействия между атмосферой и литосферой планеты, на что впервые указал крупнейший американский геохимик Г. Юри. В реакциях с кремниевой кислотой карбонатов, наиболее распространенными из которых на Земле являются кальциты и магнезиты (доломиты), выделяет-

ся углекислый газ и образуются силикаты кальция и магния, относящиеся к упоминавшимся группам солей кремниевой кислоты — пироксенов и амфиболов и называемые соответственно волластонит и энстатит. Поэтому соотношение между содержанием карбонатов в коре и CO_2 в атмосфере часто называют волластонитовым равновесием. Реакции эти носят обратимый характер. Согласно диаграмме волластонитового равновесия количество углекислоты, связанной в осадочном чехле Земли и оцениваемой в $3{,}7 \cdot 10^{23}$ г, оказывается сравнимым

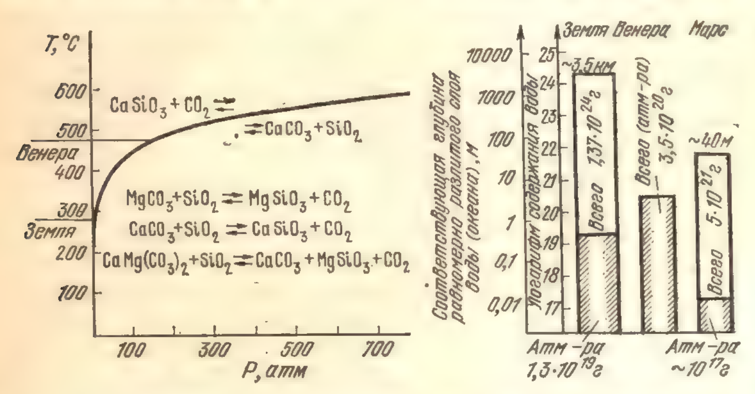


Рис. 64. Диаграмма волластонитового равновесия и содержания воды (в том числе в атмосфере) на планетах земной группы.

с содержанием CO_2 в атмосфере Венеры при температуре 750 К ($4{,}8 \cdot 10^{23}$ г). Последнее значение отвечает, таким образом, уровню разогрева, при котором карбонаты стали неустойчивыми минеральными формами на поверхности планеты и произошло их разложение (рис. 64).

Значительно сложнее объяснить ситуацию с водой. При допущении о «геохимическом подобии» процессов эволюции планетных недр и дегазации летучих количество отогнанной на Венере воды должно было бы соответствовать объему земной гидросферы, который составляет примерно 1370 млн. км^3, или свыше $1{,}37 \cdot 10^{24}$ г. Между тем на поверхности Венеры вода не сохраняется, поскольку температура там выше критической, равной 374 °С. Это утверждение остается справедливым и для водных растворов (рассолов), для которых критическая температура обычно несколько выше (≈400—425 °С). Что же касается атмосферы, то если с учетом проводив-

шихся ранее значений принять среднее относительное содержание водяного пара 0,05%, количество воды оказывается равным $3{,}5 \cdot 10^{20}$ г. Это значительно превышает содержание воды в земной атмосфере ($\approx 1{,}3 \cdot 10^{19}$ г), но на три с половиной порядка меньше запасов воды в гидросфере (см. рис. 64).

Следует, конечно, при этом иметь в виду два дополнительных соображения. Во-первых, что по аналогии с Землей определенное количество воды могло сохраниться в венерианской коре — как в виде химически связанной (конституционной и кристаллизационной) воды минералов, так и свободной (гравитационной) воды, очевидно, находящейся в парообразном состоянии. Содержание воды в земной коре по разным источникам оценивается от 4—5 до 30—50% от массы гидросферы, из которых около 25% приходится на долю связанной воды. Применительно к Венере более вероятным кажется нижний из указанных пределов по причине удержания преимущественно связанной воды. Во-вторых, опять же по аналогии с Землей, много воды может быть в мантии Венеры. Мы уже говорили о том, что согласно представлениям, развивавшимся А. П. Виноградовым, лишь небольшая доля летучих, содержащихся или продуцированных в мантии Земли, была дегазирована в атмосферу и гидросферу за всю геологическую историю нашей планеты. В частности, объем гидросферы по его оценкам не превышает 7,5% от общих запасов воды в мантии. Если примерно та же оценка справедлива для Венеры (что при схожем характере тепловой эволюции обеих планет кажется вполне вероятным), то потенциальные возможности иметь свою гидросферу в случае благоприятного изменения климата у Венеры сохраняются.

Иные процессы климатической эволюции, очевидно, происходили на Марсе. Его равновесная температура существенно ниже нуля, и отгонявшаяся из недр вода могла находиться на поверхности в жидком состоянии лишь при наличии достаточно плотной атмосферы, способствовавшей созданию парникового эффекта и росту температуры. Трудно сейчас ответить на вопрос о том, была ли вода на поверхности Марса лишь на определенном этапе эволюции или появлялась регулярно на протяжении сравнительно длительного периода, но оставленные ею следы в виде высохших речных русел и ледниковых выпахиваний (экзараций) довольно очевидны.

В первом случае следует допустить, что на планете однажды произошло резкое изменение климата, вероятно где-то в пределах 1 млрд. лет назад, и что до этого момента Марс, проходивший вершину своей геологической эволюции, был больше всего похож на Землю. Но нельзя исключить, что колебания марсианского климата происходили неоднократно, подобно периодам великих оледенений на Земле. Высказываются даже предположения, что они происходят и сейчас с периодом от нескольких сот тысяч до миллиона лет, основываясь на упоминавшихся ранее расчетах периодических колебаний наклонения околосолнечной орбиты Марса и наклона оси его вращения вследствие приливных возмущений планет и Солнца и соответственно изменения величины инсоляции на полюсах. Показанным на рис. 5 вариациям наклонения экватора (кривая «а») отвечает изменение среднегодовой инсоляции на полюсах (отношения их облучения к солнечной постоянной) приблизительно вдвое, от 0,08 до 0,18. Значительно меньшее влияние оказывают периодические изменения эксцентриситета марсианской орбиты (в пределах от 0,005 до 0,141), в результате чего облучение полюсов изменяется всего на 1—2%. Соответствующие модели рассматривались В. Уордом, Б. Мурреем и другими исследователями. Расчеты К. Сагана, П. Гираша и О. Туна привели к выводу о том, что за счет изменения наклонения, эквивалентного колебаниям светимости Солнца, могут быть два предельных устойчивых состояния атмосферы Марса: одно с такой разреженной атмосферой, как сейчас, а другое — с атмосферой, по плотности равной земной. Источником возрастания плотности более чем в 100 раз в данной модели служили полюсы, в полярных шапках которых предполагалось вымораживание больших количеств углекислоты. Было показано, что повышенное облучение полюсов за счет большего наклона оси вращения по сравнению с нынешним (примерно на 4—5°), сопровождаемое уменьшением их альбедо, в принципе способно создать такую атмосферу и одновременно растопить водяной лед.

Более поздними измерениями, выполненными «Викингами», не было, однако, обнаружено значительных количеств «сухого» льда в шапках в чистом виде. По-видимому, основная масса дегазированной углекислоты находится в марсианском реголите, а также в отложениях тонкодисперсного пылевого материала вокруг по-

люсов и в напластованиях равнинных областей приполярных широт. Тем не менее и в этом случае равновесное состояние между количеством адсорбированного углекислого газа и его парциальным давлением в атмосфере определяется температурой. А это означает, что представления о возможности изменения плотности атмосферы в зависимости от изменения наклона оси вращения в целом остаются справедливыми.

Конечно, было бы заманчиво поверить, что нам просто не довелось увидеть Марс другим, с более благоприятным климатом, из-за недостаточно большого наклона оси его вращения в современную эпоху, и что это посчастливится увидеть нашим далеким потомкам примерно сто тысяч лет спустя. Однако против такой привлекательной гипотезы говорит тот факт, что прорытые водой и ледниками русла и ложбины, по-видимому, образовались раньше, чем относительно более молодые кратеры ударного происхождения на их высохшей поверхности, возраст которых оценивается по меньшей мере в десятки миллионов лет. Поэтому большего внимания заслуживает, на наш взгляд, предположение о циклических изменениях уровня светимости Солнца, выдвинутое американским астрофизиком Фаулером в связи с попытками объяснения парадокса солнечных нейтрино. Так называют значительно меньший (примерно в 5 раз) регистрируемый на Земле поток нейтрино от Солнца по сравнению с ожидаемым их выходом в результате ядерных реакций, считающихся главных механизмом генерации солнечной энергии. Найденная корреляция этих циклов, повторяющихся с периодичностью $\approx 10^8$ лет, с великими оледенениями на Земле естественным образом могла бы объяснить как периодические колебания марсианского климата, так и, возможно, значительные климатические вариации на других планетах.

Для выяснения путей эволюции атмосферы и древнего климата Венеры и Марса очень важное значение имеют результаты масс-спектрометрических измерений в атмосферах этих планет содержаний малых примесей, в первую очередь инертных газов и отношений основных изотопов (см. табл. 3). Как уже говорилось, путем сопоставления измеренных концентраций инертных газов с их абсолютным и относительным содержанием в земной атмосфере и газовой фракции метеоритов можно судить о степени их первичного фракционирования на ста-

дии аккумуляции и происшедшей за геологическое время степени дегазации на планете. Анализ изотопного состава позволяет дополнительно выяснить степень дегазации и фракционирования летучих при диссипации газов из планетной атмосферы.

На Венере отношение содержания радиогенного изотопа аргона ^{40}Ar к содержанию первичных изотопов аргона ^{36}Ar и ^{38}Ar приблизительно равно единице, в то время как на Земле это отношение в 300, а на Марсе в 3000 раз больше. В то же время абсолютные содержания ^{40}Ar на Земле и Венере примерно одинаковы, а на Марсе приблизительно на порядок меньше. О чем это говорит?

Во-первых, о том, что степень дегазации вещества Венеры очевидно была выше, чем у Земли, поскольку дегазация ^{40}Ar происходит медленнее, чем его первичных изотопов. А значит, большее количество летучих атмофильных элементов перешло в атмосферу Венеры. В то же время на Марсе запас летучих, вероятно, истощен по сравнению с соответствующим запасом на Земле, что, по-видимому, связано с меньшей степенью дифференциации марсианского вещества и малой массой этой планеты.

Во-вторых, о том, что первичные изотопы аргона и других летучих в основном находятся в венерианской атмосфере, в противоположность Марсу, где они в большей степени аккумулированы в твердых поверхностных породах. Наконец, если дополнительно принять во внимание отношения измеренных содержаний первичного аргона и криптона (отнесенных к единице массы небесного тела), то оказывается, что на Венере и Марсе они наиболее близки к углистым хондритам типа С (точнее к группе С 3 внутри хондритов этого типа), в то время как к содержаниям на Земле ближе всего обычные хондриты группы Н, обогащенные железом.

Это последнее обстоятельство, с учетом рассматривавшейся нами ранее конденсационной последовательности формирования вещества планет и метеоритов на различных удалениях от Солнца, имеет особенно важные следствия. Оно свидетельствует в пользу предположения о неоднородном характере аккумуляции планетных тел (гетерогенной аккреции), при которой после сформирования основной массы планеты на завершающей стадии выпадали метеориты, состоящие из наиболее поздних конденсатов протопланетной туманности. Убедительные доказательства вероятной реализуемости та-

кого механизма, исходя из подробного геохимического анализа содержаний летучих в веществе планет и метеоритов, были недавно даны Э. Андерсом и Т. Оуэном.

К этим поздним конденсатам в первую очередь относятся углистые хондриты, обогащенные, как уже отмечалось, гидратированными силикатами, газами и даже органическими веществами. По содержанию водорода к хондритам группы С3 довольно близки хондриты группы Н. Тогда, допуская идентичность факторов высвобождения первичных изотопов аргона и водорода на Земле и Венере, можно в подкрепление сделанного выше предположения прийти к выводу о сопоставимых количествах воды, отогнанных на поверхности обеих планет за геологическую эпоху. Для Марса одновременно надо принять во внимание его массу, примерно в 9 раз меньшую по сравнению с массами Земли и Венеры.

Итак, мы находим вполне определенные дополнительные подтверждения представлениям о решающей роли расположения земных планет относительно Солнца на ход их климатической эволюции. В противном случае трудно объяснить, почему Венера потеряла столь огромную массу воды, равную объему земных океанов, а Марс «законсервировал» значительно более умеренное количество воды на своей поверхности в виде льда.

Основным механизмом потерь воды на Венере, видимо, была диссоциация водяного пара ультрафиолетовым излучением, с последующим убеганием водорода из атмосферы, хотя это предположение сталкивается с определенными трудностями. Прежде всего, остается открытым вопрос, накапливались ли в атмосфере значительные запасы воды, способствовавшие созданию наиболее мощной фазы парникового эффекта, либо потеря воды происходила более или менее равномерно. Мы видели, что при современных условиях требуемое относительное содержание паров H_2O в атмосфере Венеры ничтожно, поскольку экранирование тепловой радиации почти целиком обеспечивается полосами поглощения углекислоты за счет модификации их структуры при высоких температурах и давлениях. Отсюда, однако, не следует, что основная непрозрачность создавалась за счет накопления CO_2 и на более ранних этапах эволюции. Но даже в том случае, если водяной пар в атмосфере не накапливался и его потеря была равномерной, нужно допустить, что требуемый для эвакуации отогнанного количества во-

ды поток молекул водорода из атмосферы достигал громадной величины — около $7 \cdot 10^{10}$ $см^{-2} \cdot с^{-1}$. Это примерно на 3—4 порядка выше современной скорости диссипации водорода из атмосфер Земли и Венеры, а бо́льшие значения вообще кажутся нереальными.

Необходимо также указать, за счет каких процессов происходило связывание громадной массы высвободившегося кислорода. Атмосферные составляющие, даже с учетом химии облаков, вряд ли могли сыграть здесь определяющую роль. Маловероятно, что весь избыток кислорода пошел на окисление углерода, в силу более реального предположения о первичном происхождении атмосферного CO_2 за счет дегазации из недр. Что же касается диссипации кислорода из атмосферы, то для этого потребовалась бы экзосферная температура свыше 1500 К, что в несколько раз больше современного значения, а в условиях интенсивного радиационного выхолаживания молекулами углекислого газа вообще вряд ли возможно. Скорее всего кислород связывался поверхностными породами, и это заставляет предполагать значительно бо́льшую по сравнению с Землей тектоническую активность на Венере, требуемую для эффективного подвода к поверхности из глубины свежего неокисленного материала.

Если теперь обратиться к Марсу, то результаты изотопного анализа и соотношений летучих ($CO_2/^{36}Ar$; $N_2/^{36}Ar$) дают основание считать, что когда-то он действительно обладал более плотной атмосферой за счет приблизительно в 20 раз большего по отношению к существующему содержания углекислого газа и примерно от 10 до 100 раз большего содержания азота. Последняя оценка сделана на основании измеренного изотопного отношения азота ($^{15}N/^{14}N$), которое оказалось примерно на 75% выше, чем в атмосфере Земли, в то время как изотопные отношения других распространенных составляющих — кислорода и углерода — сохраняются примерно аналогичными земным. Это приводит нас к важному выводу о том, что, хотя даже в самые благоприятные периоды атмосфера Марса оставалась по крайней мере вдесятеро менее плотной, чем земная, такая атмосфера была способна создать заметный парниковый эффект и сохранить на поверхности жидкую воду.

Общее отогнанное количество воды на Марсе оценивается величиной $5 \cdot 10^{21}$ г, что соответствует средней

глубине равномерно разлитого на поверхности слоя около 40 м; это примерно на два порядка меньше, чем на Земле, но вместе с тем на порядок больше, чем на Венере (см. рис. 64). Можно ожидать, что почти вся эта масса отогнанной воды захоронена сейчас на Марсе в приповерхностных ледниках и полярных шапках, если исходить из предположения, что скорость диссипации атомов водорода на протяжении всей геологической истории планеты соответствовала современной величине потока (около 10^8 см$^{-2}$ с$^{-1}$). В этом случае количество потерянной воды (в величине эффективного слоя) не должно было превысить 3—5 м.

Интересно отметить, что, помимо адсорбирования на марсианском реголите и в напластованиях приполярных областей, одним из каналов эвакуации CO_2 из атмосферы могли бы быть уже упоминавшиеся соединения включения — клатраты. Легко убедиться в том, что для оцененного выше количества H_2O и CO_2 молярное отношение для клатрата $CO_2 \cdot nH_2O$ соответствует $n \approx 4$—5, что почти совпадает с нижним пределом для газовых гидратов при нормальном давлении.

Может возникнуть вполне естественный вопрос: только ли удаленность от Солнца повлияла на климат Марса и что случилось бы с ним, окажись он по своим размерам таким же, как Земля и Венера? Можно предполагать, что в этом случае Марс аккумулировал и удержал бы существенно большее количество летучих (чему особенно благоприятствует гипотеза гетерогенной аккреции), а вследствие иного хода тепловой эволюции степень дифференциации слагающего вещества и дегазации была более полной. Такой Марс, очевидно, обладал бы значительно более плотной атмосферой и умеренным климатом. С учетом приведенных выше различий по массе и степени дегазации по сравнению с Землей, оцененную массу отогнанной воды следовало бы увеличить, по крайней мере, в 25—30 раз, что дало бы сопоставимый с земной гидросферой слой толщиной около 1 км.

Состав атмосферы Марса, включающий кислород, азот, углерод, близкая к арктическим и антарктическим районам Земли температура поверхности и обилие воды в ее верхних горизонтах казалось бы благоприятствуют оптимистическим надеждам обнаружить признаки жизни на этой планете. К сожалению, биологические эксперименты с марсианским грунтом на посадочных аппа-

ратах «Викинг» оставили этот вопрос без ответа или скорее принесли больше отрицательных, чем положительных результатов. Видимо, в условиях эффективной естественной стерилизации за счет проникающей до поверхности жесткой ультрафиолетовой радиации (с энергией фотонов до 6—7 эВ) и сильно окисленной среды в грунте, содержащим перекисные соединения (пероксиды) шансов обнаружить жизнь на Марсе мало.

Есть основания предполагать, что ряд казавшихся позитивными свидетельств биологической активности в каждом из трех типов биологических экспериментов на «Викингах» — газовый обмен, разложение метки и ассимиляция углерода (в двух последних случаях с использованием меченых атомов углерода ^{14}C) — объясняются процессами химического взаимодействия. В частности, интенсивное выделение кислорода в начальной фазе эксперимента по газовому обмену скорее всего связано с обилием в грунте пероксидов, а не с процессами метаболизма. Важным аргументом против наличия живых форм служит также чрезвычайно низкий порог обнаружения на поверхности и в приповерхностном слое органических молекул ($\approx 10^{-6}$ по массе по отношению к неорганическим). Вместе с тем вполне возможно, что отрицательный результат миссии «Викингов» был предопределен недостаточной чувствительностью использованных методов в столь неблагоприятных для жизни современных условиях на Марсе. Нельзя, конечно, исключить того, что эти условия могли быть значительно более благоприятными в ранней истории планеты или на определенных этапах ее климатической эволюции, когда на поверхности появлялась жидкая вода. Поэтому большой интерес представили бы попытки обнаружения простейших форм палеожизни в марсианском грунте, доступных непосредственным методам анализа в земных лабораториях.

Пока еще надежды найти признаки жизни на Марсе, а также в атмосферах Венеры, Юпитера или Сатурна сохраняются, хотя вероятность ее существования там ничтожно мала. Если же в дальнейшем с ними придется окончательно расстаться, это лишь с большей остротой поставит вопрос о том, почему жизнь возникла и интенсивно развилась лишь на третьей от Солнца планете,— вопрос, имеющий не только естественнонаучное, но и громадное философское, мировоззренческое значение.

Вы можете ль сказать, кто приковал
К известному пространству человека?..
Когда б любовь оправдывалась в мире,
Отечеством была бы вся земля
И человек тогда душою вольной
Равно любил бы весь широкий мир,
Отечеством бы звал не только землю,
Он звал бы им и звезды и планеты!

А. К. Толстой,
«Дон-Жуан»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Солнечная система предоставила в наше распоряжение уникальные примеры сложившихся природных комплексов, отличных от нашей собственной планеты. Их изучение во всей взаимосвязи и в зависимости от определяющих факторов, привело к становлению сравнительной планетологии, от успехов развития которой будет, в частности, зависеть лучшее понимание механизмов, лежащих в основе природы Земли и ее места как члена Солнечной системы.

Все это формирует новый подход к решению стоящих перед исследователями задач, осознанию общности природы разнообразных явлений. Достаточно назвать обнаруженные закономерности элементного и минералогического состава вещества планет и метеоритов, общность характера тепловой эволюции, вулканической и тектонической активности и геологических структур на планетах земной группы, обнаружение глубокой связи между процессом формирования планет и их массы с формированием вращательного движения, ряд сходных черт циркуляции на Венере и океанической циркуляции на Земле, вероятную корреляцию периодов оледенения и климатической эволюции на Земле и Марсе и т. д. Возникли сравнительная геология, сравнительная метеорология и климатология, на новую основу поставлена проблема генезиса небесных тел, которая непосредственно связана с общими проблемами ядерной и химической эволюции вещества Солнечной системы.

По соседству с нами лежат пока еще безжизненные безграничные пространства, новые регионы в виде других планет и астероидов, которые со временем, преодолев космический океан, начнут осваивать первые поселенцы «нового света».

Неизбежность этого процесса довольно очевидна. Не следует забывать, что уровень развития жизни на Земле приобрел черты технологически развитой цивилизации лишь за последние примерно 100 лет, в то время как человечество существует уже сотни тысяч лет. И вот, уже по истечении этого совсем незначительного периода бурного развития цивилизации начал ощущаться недостаток в источниках минерального сырья, энергетических ресурсов, возникли проблемы перенаселенности отдельных районов, загрязнения окружающей среды и т. п. Соответственно обострились и социальные проблемы. Непрерывно возрастающие темпы научно-технического прогресса и экономического развития ускоряют этот процесс. Поэтому человечество третьего тысячелетия будет поставлено перед необходимостью освоения новых территорий в ближайшей окрестности собственной звезды, максимального использования ее энергетической отдачи, освоения громадных природных богатств планет и астероидов. Это многократно усилит «шепоты Земли», как назван рассказ о нашей прекрасной планете, записанный на специальных металлических пластинках, вложенных внутрь космических аппаратов «Вояджер», которым предстоит покинуть Солнечную систему.

Таким образом, цель изучения планет не ограничивается и не исчерпывается накоплением знаний о том, как устроены и функционируют соседние с нами миры, как они возникли и эволюционировали. Это — один из разделов фундаментальных наук, с которым будет тесным образом связано решение многих технико-экономических и социальных проблем на пути дальнейшего развития цивилизации.

Человечество является полноправным хозяином всего околосолнечного пространства, хозяином пока еще безжизненных планет, и несомненно, что не в столь уж отдаленной перспективе сможет овладеть их богатствами. Мы говорим о высокой оценке будущими поколениями сегодняшних усилий наших современников именно потому, что были у истоков этого грандиозного пути.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Белецкий В. В. Очерки о движении космических тел.— М.: Наука, 1972.

Виноградов А. П. Введение в геохимию океана.— М.: Наука, 1967.

Войткевич Г. В. Химическая эволюция Солнечной системы.— М.: Наука, 1979.

Голицын Г. С. Введение в динамику планетных атмосфер.— Л.: Гидрометеоиздат, 1973.

Гребеников Е. А., Рябов Ю. А. Поиски и открытия планет.— М.: Наука, 1975.

Гуди Р., Уолкер Дж. Атмосферы.— М.: Мир, 1975.

Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет.— М.: Наука, 1978.

Каула У. Введение в физику планет земной группы.— М.: Мир, 1971.

Келдыш М. В., Маров М. Я. Космические исследования.— М.: Наука, 1981.

Кондратьев К. Я. Метеорология планет.— Л.: Изд. ЛГУ, 1977.

Космохимия Луны и планет / Под ред. А. П. Виноградова.— М.: Наука, 1975.

Ксанфомалити Л. В. Планеты, открытые заново.— М.: Наука, 1978.

Кузьмин А. Д., Маров М. Я. Физика планеты Венера.— М.: Наука, 1974.

Куликов К. А., Сидоренко Н. С. Планета Земля.— М.: Наука, 1977.

Левин Б. Ю. Происхождение Земли и планет.— 4-е изд.— М.: Наука, 1964.

Луна / Под ред. С. С. Ранкорна и Г. Юри.— М.: Мир, 1975.

Монин А. С. История Земли.— Л.: Наука. Ленинградское отделение, 1977.

Мороз В. И. Физика планеты Марс.— М.: Наука, 1978.

Первые панорамы поверхности Венеры / Под ред. М. В. Келдыша.— М., 1979.

Происхождение Солнечной системы / Под ред. Г. Ривса.— М.: Мир, 1976.

Сафронов В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет.— М.: Наука, 1969.

Шкловский И. С. Вселенная, жизнь, разум.— М.: Наука, 1980.

Юпитер / Под ред. Т. Герелса.— М.: Мир, 1978—79. (Ч. I, II, III.)

ОГЛАВЛЕНИЕ

50 коп.

